



ITS

Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - EE 184801

SIMULASI SISTEM HIBRIDA BATERAI DAN SUPERKAPASITOR MENGGUNAKAN KONTROL LOGIKA FUZZY UNTUK PENGHALUS DAYA LUARAN TURBIN ANGIN

Rizka Prambudi
NRP 07111540000048

Dosen Pembimbing
Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph. D.
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M. Eng.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019



ITS

Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - EE 184801

**SIMULASI SISTEM HIBRIDA BATERAI DAN
SUPERKAPASITOR MENGGUNAKAN KONTROL LOGIKA
FUZZY UNTUK PENGHALUS DAYA LUARAN TURBIN
ANGIN**

Rizka Prambudi
NRP 07111540000048

Dosen Pembimbing
Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph. D.
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M. Eng.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019



FINAL PROJECT - EE 184801

**SIMULATION OF BATTERY AND SUPERCAPACITOR
HYBRID SYSTEM USING FUZZY LOGIC CONTROL FOR
SMOOTHING OUTPUT POWER OF WIND TURBINE**

Rizka Prambudi
NRP 07111540000048

Supervisors
Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph. D.
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M. Eng.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019

**SIMULASI SISTEM HIBRIDA BATERAI DAN
SUPERKAPASITOR MENGGUNAKAN KONTROL LOGIKA
FUZZY UNTUK PENGHALUS DAYA LUARAN TURBIN ANGIN**

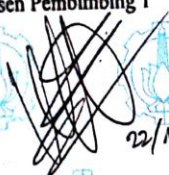
TUGAS AKHIR


Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui :

Dosen Pembimbing 1

Dosen Pembimbing 2


Listyaningrum, S.T., M.Sc., Ph.D.
198208292006042001


Dr. Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M. Eng.
NIP. 197309271998031004



PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul **“SIMULASI SISTEM HIBRIDA BATERAI DAN SUPERKAPASITOR MENGGUNAKAN KONTROL LOGIKA FUZZY UNTUK PENGHALUS DAYA LUARAN TURBIN ANGIN”** adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip mapupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Januari 2019



Rizka Prambudi

07111540000048

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

SIMULASI SISTEM HIBRIDA BATERAI DAN SUPERKAPASITOR MENGGUNAKAN KONTROL LOGIKA FUZZY UNTUK PENGHALUS DAYA LUARAN TURBIN ANGIN

Nama mahasiswa : Rizka Prambudi
Dosen Pembimbing I : Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph. D.
Dosen Pembimbing II : Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M. Eng.

ABSTRAK

Salah satu karakteristik yang dimiliki oleh pembangkit listrik tenaga angin adalah fluktuasi daya keluaran dikarenakan kecepatan angin yang bervariasi. Salah satu solusi untuk mengatasi hal tersebut adalah dengan menambahkan penyimpanan energi hibrida, yang terdiri dari baterai dan superkapasitor kedalam sistem pembangkit ini yang bekerja sebagai penghalus daya. Setiap penyimpan energi memiliki kapasitas energi yang dinyatakan oleh SOC (*State of Charge*). SOC sebesar 100% berarti penyimpanan energi dalam kondisi penuh, sedangkan 0% menyatakan penyimpanan energi dalam kondisi kosong. Tugas akhir ini berisi simulasi penyimpanan energi hibrida sebagai penghalus daya dengan mempertimbangkan SOC masing-masing penyimpanan energi menggunakan kontrol fuzzy. Berdasarkan hasil simulasi pada Tugas Akhir ini dapat disimpulkan bahwa kontrol fuzzy berhasil menjaga SOC baterai dan superkapasitor tetap pada level yang diinginkan, yaitu diantara 25% sampai 95%. Selain itu, baterai dan superkapasitor dapat bekerja sama dengan baik sebagai penyimpanan energi hibrida dalam menjaga tegangan beban tetap konstan pada berbagai kondisi kecepatan angin dan daya beban.

Kata kunci: Superkapasitor, Pembangkit Listrik Tenaga Angin, Penyimpan Energi Hibrida, Baterai, Logika Fuzzy

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

SIMULATION OF BATTERY AND SUPERCAPACITOR HYBRID SYSTEM USING FUZZY LOGIC CONTROL FOR SMOOTHING OUTPUT POWER OF WIND TURBINE

Student Name : Rizka Prambudi
Supervisor I : Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph. D.
supervisor II : Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M. Eng.

ABSTRACT

One of the characteristics possessed by wind power generation is the fluctuation of power generated due to varying wind speed inputs. One of the solutions to solve this problem is by adding hybrid energy storage systems, consist of battery and supercapacitor, into this generating system that works as a power smoothing. Every energy storage has a energy capacity manifested by SOC (State of Charge). SOC of 100% means that the energy storage is in full condition, while 0% stating that the energy storage is in empty condition. This final project simulates the hybrid energy storage system as the power smoothing by considering the SOC of each energy storage using fuzzy logic controller. Based on the results of the simulation, it can be inferred that the fuzzy control managed to keep the battery and supercapacitor working at the desired level of SOC, between 25% to 95%. In addition, battery and supercapacitor can work well together as the hybrid energy storage system to maintain the DC Link voltage constant at various conditions of wind speed and power load.

Key Word: *Supercapacitors, Wind Power Generation, Hybrid Energy Storage Systems, Batteries, Fuzzy Logic Controller*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Tiada kata yang mampu menggambarkan seberapa banyak syukur yang harus penulis panjatkan kepada Allah Subhanahu Wata'ala, atas segala Rahmat, Karunia, dan Petunjuk yang telah dilimpahkan-Nya, walaupun baragam tantangan menghadang, pada akhirnya penulis mampu menyelesaikan Tugas Akhir ini yang berjudul **“SIMULASI SISTEM HIBRIDA BATERAI DAN SUPERKAPASITOR MENGGUNAKAN KONTROL LOGIKA FUZZY UNTUK PENGHALUS DAYA LUARAN TURBIN ANGIN”**.

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Atas selesainya penyusunan tugas akhir ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT atas limpahan rahmat, karunia dan petunjuk-Nya.
2. Ibunda Krisna Luxmi dan Ayahanda Hendra Jaya atas segala doa dan cinta yang tak henti pada penulis dalam keadaan apapun. Semoga Allah SWT senantiasa melindungi dan memberi mereka tempat terbaik kelak di surgaNya.
3. Ibu Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph. D. dan Bapak Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M. Eng. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan dan perhatiannya selama proses penyelesaian Tugas Akhir ini.
4. Tim Superkapasitor, mas Deny, mas Saiful, mas Adit, mas Rusdi, dan mas Epan yang telah menjadi teman diskusi dalam topik superkapasitor.
5. Teman-teman seperjuangan e55 yang telah menemani dan menorehkan cerita selama masa kuliah sampai penyusunan Tugas Akhir ini
6. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Elektro ITS yang telah memberikan banyak ilmu dan menciptakan suasana belajar yang luar biasa.

Penulis telah berusaha maksimal dalam penyusunan tugas akhir ini. Namun tetap besar harapan penulis untuk menerima saran dan kritik

untuk perbaikan dan pengembangan tugas akhir ini. Semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat yang luas.

Surabaya, Januari 2019

Rizka Prambudi
07111540000048

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR.....	i
ABSTRAK.....	iii
ABSTRACT.....	v
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR ISTILAH	xv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan	3
1.5 Metodologi.....	3
1.6 Sistematika Penulisan	4
1.7 Relevansi	4
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	5
2.1 Kajian Pustaka dan Penelitian Terkait	5
2.2 Turbin Angin	7
2.3 <i>Permanent Magnet Synchronouos Generator</i>	9
2.4 <i>Maximum Power Point Tracking (MPPT)</i>	9
2.5 Penyearah 3 Fasa	11
2.6 <i>Boost Converter</i>	13
2.7 <i>Bidirectional DC-DC Converter</i>	15
2.8 Baterai.....	16
2.9 Superkapasitor	18
2.10 Logika Fuzzy	20
BAB 3 PEMODELAN SISTEM.....	23
3.1 Konfigurasi Sistem Konversi Energi Angin	23
3.2 <i>Energy Management Systems (EMS)</i>	23
3.3 Kecepatan Angin	29
3.4 Model Turbin Angin dan PMSG	30
3.5 Model Penyearah 3 Fasa	33
3.6 Model Konverter Boost	34
3.7 Model Konverter Bidirectional	36
3.8 Model Baterai	37
3.9 Model Superkapasitor	38

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	39
4.1 Pengujian Penyimpan Energi Hibrida sebagai <i>Power Smoothing</i>	39
4.1.1 Kecepatan Angin Berubah dan Daya Beban Konstan (kasus 1).....	39
4.1.2 Kecepatan Angin Konstan dan Daya Beban Berubah (kasus 2).....	42
4.1.3 Kecepatan Angin Berubah dan Daya Beban Berubah (kasus 3).....	46
4.2 Pengujian <i>Energy Management Systems</i> (EMS)	50
4.2.1 Pengujian Batas Atas SOC.....	50
4.2.2 Pengujian Batas Bawah SOC.....	54
BAB 5 PENUTUP	59
5.1 Kesimpulan.....	59
5.2 Saran.....	59
DAFTAR PUSTAKA	61
BIODATA PENULIS	63

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Turbin Angin Sumbu Horisontal	8
Gambar 2.2 Turbin Angin Sumbu Vertikal	8
Gambar 2.3 Algoritma Perturb and Observe	11
Gambar 2.4 Penyearah 6 Pulsa Tak Terkontrol.....	12
Gambar 2.5 Rangkaian Konverter Boost.....	13
Gambar 2.6 Kondisi saat Saklar S konduksi dan Padam	14
Gambar 2.7 Konverter DC-DC Bidirectional	15
Gambar 2.8 Rangkaian Ekivalen Baterai.....	17
Gambar 2.9 Rangkaian Ekivalen Superkapasitor	20
Gambar 2.10 Proses Logika Fuzzy	21
Gambar 3.1 SKEA dengan Penyimpan Energi Hibrida.....	23
Gambar 3.2 Skema kontrol Tegangan DC Link	24
Gambar 3.3 <i>Skema Energy Management Systems</i>	25
Gambar 3.4 Fungsi Keanggotaan I_{dc-ref}	26
Gambar 3.5 Fungsi Keanggotaan SOC Baterai	26
Gambar 3.6 Fungsi Keanggotaan SOC Superkapasitor.....	26
Gambar 3.7 Fungsi Keanggotaan $i_{bat-ref}$ 1.....	27
Gambar 3.8 Fungsi Keanggotaan $i_{bat-ref}$ 2.....	27
Gambar 3.9 Fungsi Keanggotaan i_{sc-ref} 1	27
Gambar 3.10 Fungsi Keanggotaan i_{sc-ref} 2	28
Gambar 3.11 Kecepatan Angin	29
Gambar 3.12 Kurva Karakteristik Turbin Angin.....	30
Gambar 3.13 Daya Keluaran Turbin Angin.....	30
Gambar 3.14 Koefisien Performa (C_p) Turbin Angin	31
Gambar 3.15 Daya Keluaran PMSG	32
Gambar 3.16 Daya Keluaran Penyearah 3 Fasa	33
Gambar 3.17 Daya Keluaran Konverter Boost.....	34
Gambar 3.18 Tegangan Masukan dan Keluaran Konverter Boost	35
Gambar 4.1 Kecepatan Angin Kasus 1	40
Gambar 4.2 Kebutuhan Daya Beban Kasus 1.....	41
Gambar 4.3 Daya Turbin dan Daya Aktual Beban Kasus 1	41
Gambar 4.4 Daya Baterai dan Daya Superkapasitor Kasus 1.....	41
Gambar 4.5 SOC Baterai Kasus 1	42
Gambar 4.6 SOC Superkapasitor Kasus 1	42
Gambar 4.7 Tegangan DC Link Kasus 1	42
Gambar 4.8 Kecepatan Angin Kasus 2.....	44
Gambar 4.9 Kebutuhan Daya Beban Kasus 2.....	44

Gambar 4.10	Daya Turbin dan Daya Aktual Beban Kasus 2	45
Gambar 4.11	Daya Baterai dan Daya Superkapasitor Kasus 2	45
Gambar 4.12	SOC Baterai Kasus 2	45
Gambar 4.13	SOC Superkapasitor Kasus 2.....	46
Gambar 4.14	Tegangan DC Link Kasus 2.....	46
Gambar 4.15	Kecepatan Angin Kasus 3	48
Gambar 4.16	Kebutuhan Daya Beban Kasus 3	48
Gambar 4.17	Daya Turbin dan Daya Aktual Beban Kasus 3	49
Gambar 4.18	Daya Baterai dan Daya Superkapasitor Kasus 3	49
Gambar 4.19	SOC Baterai Kasus 3	49
Gambar 4.20	SOC Superkapasitor Kasus 3.....	50
Gambar 4.21	Tegangan DC Link Kasus 3	50
Gambar 4.22	Kecepatan Angin pada Pengujian Batas Atas SOC	51
Gambar 4.23	Kebutuhan Daya Beban pada Pengujian Batas Atas SOC	52
Gambar 4.24	Daya Turbin dan Daya Aktual Beban pada Pengujian Batas Atas SOC	52
Gambar 4.25	Daya Baterai dan Daya Superkapasitor pada Pengujian Batas Atas SOC	53
Gambar 4.26	SOC Baterai pada Pengujian Batas Atas SOC	53
Gambar 4.27	SOC Superkapasitor pada Pengujian Batas Atas SOC ...	53
Gambar 4.28	Tegangan DC Link pada Pengujian Batas Atas SOC	54
Gambar 4.29	Kecepatan Angin pada Pengujian Batas Bawah SOC	56
Gambar 4.30	Kebutuhan Daya Beban pada Pengujian Batas Bawah SOC	56
Gambar 4.31	Daya Turbin dan Daya Aktual Beban pada Pengujian Batas Bawah SOC	56
Gambar 4.32	Daya Baterai dan Daya Superkapasitor pada Pengujian Batas Bawah SOC	57
Gambar 4.33	SOC Baterai pada Pengujian Batas Bawah SOC	57
Gambar 4.34	SOC Superkapasitor pada Pengujian Batas Bawah SOC	57
Gambar 4.35	Tegangan DC Link pada Pengujian Batas Bawah SOC	58

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Rules Ibat-ref 1	28
Tabel 3.2 Rules Ibat-ref 2	28
Tabel 3.3 Rules Isc-ref 1	28
Tabel 3.4 Rules Isc-ref 2	29
Tabel 3.5 Parameter PMSG.....	31
Tabel 3.6 Efisiensi PMSG	32
Tabel 3.7 Efisiensi Penyearah 3 Fasa	33
Tabel 3.8 Efisiensi Konverter Boost	35
Tabel 3.9 Parameter Modul Baterai.....	36
Tabel 3.10 Parameter Modul Superkapasitor	37

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISTILAH

AC	= <i>Alternating Current</i> , merupakan arus listrik yang arahnya bolak – balik (Ampere).
Batttype	= Tipe baterai yang digunakan dalam perhitungan arus pengosongan dan pengisian baterai.
<i>Blade</i>	= Baling – baling pada turbin angin yang akan berputar jika terkena angin.
<i>Boost</i>	= Mode pengosongan dalam konverter bidirectional.
<i>Buck</i>	= Mode pengisian pada konverter bidirectional
Bus DC	= Tempat pertemuan berbagai titik dalam sistem kelistrikan DC
C	= kapasitor (Farad)
CCM	= <i>Continuous Current Mode</i> , kondisi dimana arus konverter tidak pernah mencapai nilai nol.
<i>Charging</i>	= Proses pengisian penyimpan energi
C_H	= Kapasitor pada sisi tegangan tinggi dari konverter bidirectional (Farad).
C_L	= Kapasitor pada sisi tegangan rendah dari konverter bidirectional (Farad).
<i>Controlled voltage source</i>	= Sumber tegangan yang nilainya dikontrol oleh sebuah fungsi (Volt).
D Bat	= Siklus kerja dari konverter bidirectional milik baterai.
D SC	= Siklus kerja dari konverter bidirectional milik superkapasitor.
DC	= <i>Direct Current</i> , merupakan arus listrik yang arah alirannya searah (Ampere).
DCM	= <i>Discontinuous Current Mode</i> , kondisi dimana arus konverter menyentuh nilai nol.
<i>DC link</i>	= Tautan DC, merupakan sistem kelistrikan DC yang menghubungkan antara pembangkit listrik (AC) dengan beban (AC).

<i>Degree of membership</i>	= Derajat keanggotaan, merupakan kurva yang menentukan derajat masukan logika fuzzy.
DFIG	= <i>Doubly Fed Induction Generator</i> , merupakan sebuah generator induksi.
<i>Duty cycle</i>	= Siklus kerja, merupakan lamanya saklar semikonduktor konduksi (%).
<i>Discharging</i>	= Kondisi pengosongan muatan penyimpan energi.
dP	= Perubahan daya (Watt).
dV	= Perubahan tegangan (Volt).
D1	= Dioda satu
D2	= Dioda dua
E_{charge}	= Tegangan pada saat pengisian muatan (Volt).
$E_{\text{discharge}}$	= Tegangan pada saat pengosongan muatan (Volt).
EMS	= <i>Energy Management Systems</i> , merupakan sistem kontrol untuk mengatur aliran daya antar penyimpan energi.
<i>First order low pass filter</i>	= Penyaring sinyal yang meloloskan sinyal masukan frekuensi rendah orde pertama.
FLC	= <i>Fuzzy Logic Control</i> , merupakan kontroler dari logika fuzzy.
Gearbox	= Merupakan sistem mekanik untuk mengonversi kecepatan rotasi suatu alat.
HESS	= <i>Hybrid Energy Storage Systems</i> , merupakan sistem penyimpan energi yang terdiri dari dua atau lebih penyimpan energi yang berbeda jenis.
HPF	= <i>High Pass Filter</i> , merupakan penyaring yang meloloskan sinyal masukan frekuensi tinggi.
Ibat-ref 1	= Keluaran pertama dari logika fuzzy.
Ibat-ref 2	= Keluaran kedua dari logika fuzzy.
Idc ref	= Masukan pertama dari logika fuzzy.

IHP	= <i>Inner Helmholtz Layer</i> , merupakan celah dielektrik diantara elektroda dan elektrolit.
I high	= Arus frekuensi rendah.
I low	= Arus frekuensi tinggi.
<i>Internal resistance</i>	= Resistansi dalam (Ohm).
Inverter	= Suatu alat yang mengonversi sinyal DC menjadi AC.
I Bat Aktual	= Arus baterai hasil pengukuran.
I SC Aktual	= Arus superkapasitor hasil pengukuran.
I_Bat ref	= Arus referensi baterai hasil dari proses EMS.
I_SC ref	= Arus referensi superkapasitor hasil dari proses EMS.
Isc-ref 1	= Keluaran ketiga dari logika fuzzy.
Isc-ref 2	= Keluaran keempat dari logika fuzzy.
L	= Induktor (Hnery).
LSC	= <i>Line Side Converter</i> , merupakan konverter pengontrol sisi grid.
MPP	= <i>Maximum Power Point</i> , merupakan titik daya maksimal
MPPT	= <i>Maximum Power Point Tracking</i> , merupakan algoritma untuk membuat pembangkit listrik beroperasi pada daya maksimal.
OHP	= <i>Outer Helmholtz Layer</i> , merupakan lapisan luar yang terdiri dari ion – ion bermuatan elektrolit.
<i>Pitch angle</i>	= Sudut antara <i>blade</i> dengan sumbunya.
PMSG	= <i>Permanent Magnet Synchronouos Generator</i> , merupakan generator yang flux medannya dihasilkan oleh permanent magnet.
PV	= <i>Photovoltaic</i> (panel surya), alat penghasil listrik dari sinar matahari.
<i>Polygeneration microgrids</i>	= Sistem pembangkit terdistribusi yang terdiri dari berbagai jenis pembangkit listrik terbarukan.
<i>Power</i>	= Daya listrik (Watt).

<i>Power smoothing</i>	= Sistem penghalus daya yang terdiri dari penyimpanan energi hibrida.
<i>Proportional integrator</i>	= Salah satu jenis kontrol dari kontroler PID.
<i>Ripple</i>	= riak pada arus atau tegangan yang disebabkan oleh proses pensaklaran konverter.
RSC	= <i>Rotor Side Converter</i> , merupakan konverter pengontrol sisi rotor generator.
Rules	= Aturan pada logika fuzzy.
SKEA	= Sistem Konversi Energi Angin
Slip ring	= Cincin komutasi pada generator.
SOC	= <i>State of Charge</i> , menyatakan sisa kapasitas yang tersedia pada penyimpanan energi.
SOP	= <i>State of Power</i> , menyatakan sisa kapasitas daya pada penyimpanan energi.
SOC bat	= Masukan kedua dari logika fuzzy.
SOC SC	= Masukan ketiga dari logika fuzzy
Sudut penyalan (α)	= Menentukan waktu dimulainya konverter bekerja.
Sumbu q	= sumbu yang sejajar dengan kutub magnet pada PMSG.
Sumbu d	= Sumbu yang tegak lurus terhadap kutub magnet pada PMSG.
S1	= Saklar pertama pada konverter bidirectional.
S2	= Saklar kedua pada konverter bidirectional.
<i>Time</i>	= Waktu (sekon).
<i>Tip speed ratio</i>	= Perbandingan antara kecepatan rotasi turbin dengan kecepatan angin.
V DC Link Aktual	= Tegangan DC Link hasil pengukuran.
V DC Link Referensi	= Tegangan DC Link yang dijadikan sebagai acuan dari kontroler PI.
Va	= Tegangan fasa a
Vb	= Tegangan fasa b
Vc	= Tegangan fasa c

Voltage

= Tegangan (Volt)

Wind speed

= Kecepatan angin (m/s).

ΔD

= Jarak perubahan pada *duty cycle*.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi angin merupakan salah satu sumber energi alternatif yang dapat diperbarui. Energi angin ini berupa energi kinetik yang dapat diubah menjadi energi listrik menggunakan sistem konversi energi angin yang terdiri dari turbin angin dan generator listrik [1]. Semakin cepat laju angin maka energi yang dihasilkan generator juga makin besar, begitu juga sebaliknya. Pada kenyataannya, kecepatan angin selalu berubah-ubah sehingga energi listrik yang dihasilkan oleh generator tidak konstan.

Daya keluaran generator yang tidak konstan ini menimbulkan masalah. Misalnya, pada kondisi beban membutuhkan daya konstan, saat energi angin berlebih maka efisiensi generator menurun karena daya input lebih besar daripada daya beban, sebaliknya jika energi angin menurun sampai dibawah energi yang dibutuhkan beban, maka generator tidak dapat menyuplai beban. Maka dari itu, diperlukan suatu cara untuk mengurangi fluktuasi daya keluaran generator tersebut, salah satunya adalah dengan menggunakan sistem penyimpanan energi [1].

Baterai merupakan penyimpan energi yang paling banyak digunakan. Keunggulan baterai jika dibandingkan dengan jenis yang lain adalah baterai memiliki kerapatan energi yang tinggi [2]. Namun, baterai juga memiliki beberapa kelemahan, yaitu kerapatan daya yang rendah dan siklus hidup yang pendek atau dapat dikatakan mudah rusak [3]. Oleh sebab itu, baterai tidak dapat bekerja secara optimal jika beroperasi sendiri. Diperlukan penyimpan energi lain yang dapat menutupi kelemahan baterai.

Superkapasitor memiliki kerapatan daya yang tinggi, namun memiliki kerapatan energi yang rendah [2]. Oleh karena itu, kombinasi antara superkapasitor dengan baterai akan menghasilkan penyimpanan energi yang memiliki kerapatan daya dan energi yang tinggi. Kombinasi ini sering disebut sebagai *Hybrid Energy Storage System* (HESS). Keuntungan menggunakan HESS adalah kapasitas baterai yang digunakan tidak terlalu besar dan memperpanjang umur baterai [3]. Dengan penambahan superkapasitor, maka diperlukan *Energy*

Management System (EMS), yaitu metode kontrol untuk mengatur aliran daya antara baterai dengan kapasitor.

Salah satu metode kontrol adalah dengan menggunakan *Fuzzy Logic Control (FLC)*. FLC sangat cocok digunakan pada sistem yang memiliki ketidaklinieran yang kompleks karena tidak perlu untuk membuat model matematika yang rumit dan jika dibandingkan dengan metode kontrol lainnya, FLC memiliki error yang lebih sedikit [4]. FLC sudah digunakan di banyak aplikasi EMS, antara lain adalah pada *polygeneration microgrids*, sistem microgrid DC, dan sistem energi terbarukan hybrid independen [5]. Dengan menggunakan FLC ini, diharapkan dapat mengurangi fluktuasi energi keluaran generator sehingga riak akan berkurang serta efisiensi keseluruhan sistem menjadi lebih baik.

1.2 Perumusan Masalah

Rumusan masalah yang akan dibahas dalam tugas akhir ini adalah :

1. Bagaimana mengatur aliran daya antara baterai dan superkapasitor
2. Bagaimana menjaga tegangan beban tetap konstan
3. Bagaimana menjaga *State of Charge (SOC)* baterai dan superkapasitor tetap pada level yang diinginkan

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada tugas akhir ini adalah :

1. Generator yang digunakan adalah *Permanent Magnet Synchronouos Generator (PMSG)*
2. Terdapat penyearah 3 fasa pada sisi PMSG
3. Beban diasumsikan resistif
4. Terdapat bidirectional DC-DC konverter pada baterai dan superkapasitor
5. *Energy Management System (EMS)* menggunakan *Fuzzy Logic Control (FLC)*

1.4 Tujuan

Tujuan tugas akhir ini adalah :

1. Mengatur aliran daya antara baterai dan superkapasitor
2. Mendapatkan tegangan beban yang konstan
3. Menjaga SOC baterai dan superkapasitor tetap pada level yang diinginkan

1.5 Metodologi

Metodologi yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. Pengumpulan Data
Pengumpulan data dilakukan untuk mendapatkan data-data yang diperlukan untuk keperluan tugas akhir. Ada dua jenis data, yaitu data primer dan data sekunder. Dalam topik ini, data yang dibutuhkan adalah data kecepatan angin pada suatu daerah per satuan waktu, data turbin angin, data PMSG, dan lain-lain.
2. Studi Literatur
Studi literatur bertujuan untuk menambah wawasan dan pemahaman yang berkaitan dengan topik tugas akhir. Literatur dapat diperoleh dari paper, buku, tugas akhir, thesis, artikel ilmiah, internet, dan lain-lain. Teori penunjang yang dibutuhkan adalah logika fuzzy, baterai, superkapasitor, PMSG, penyearah 3 fasa dan konverter bidirectional DC-DC.
3. Pembuatan Algoritma Fuzzy
Algoritma fuzzy dibuat dengan menggunakan software MATLAB R2015a. Algoritma yang dibuat memperhitungkan *State of Charge* (SOC) dari baterai dan superkapasitor serta arus referensi dari PMSG.
4. Pemodelan dan Simulasi Sistem
Selanjutnya adalah pemodelan sistem. Sistem yang dimaksud mencakup turbin angin, PMSG, baterai, superkapasitor, penyearah, konverter bidirectional DC-DC, dan beban. Semua komponen tersebut akan dirangkai menjadi satu kesatuan dan akan dimodelkan dan disimulasikan menggunakan perangkat lunak MATLAB R2015a.

5. Analisis Data
Hasil simulasi akan dianalisis, apakah parameter yang diamati sudah sesuai seperti yang diinginkan atau belum. Parameter-parameter yang diamati adalah tegangan beban, SOC baterai dan superkapasitor, dan daya beban.
6. Penyusunan Laporan
Seluruh proses dan hasil yang didapatkan akan disusun menjadi tulisan ilmiah dalam bentuk Buku Tugas Akhir.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam tugas akhir ini terdiri dari lima BAB dengan uraian sebagai berikut :

1. BAB 1 merupakan pendahuluan yang berisikan latar belakang masalah, tujuan, metodologi, sistematika penulisan, dan relevansi
2. BAB 2 berisikan kajian pustaka dan dasar teori yang membahas mengenai teori-teori penunjang yang berkaitan dengan sistem turbin angin yang terhubung dengan dua jenis penyimpan energi, yaitu superkapasitor dan baterai.
3. BAB 3 berisikan perancangan dan permodelan sistem turbin angin yang membahas mengenai permodelan dari masing-masing blok beserta validasinya.
4. BAB 4 berisikan simulasi dan analisis data, yang membahas tentang simulasi penyimpanan energi hibrida superkapasitor dan baterai.
5. BAB 5 berisikan kesimpulan dan saran.

1.7 Relevansi

Relevansi dari tugas akhir ini adalah antara lain :

1. Menjadi referensi bagi peneliti lain yang ingin melakukan penelitian pada bidang yang sama
2. Menjadi referensi untuk mahasiswa lain dalam mengerjakan tugas akhir jika memiliki topik yang sama

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Kajian Pustaka dan Penelitian Terkait

Dalam sub-bab ini akan dibahas mengenai kajian pustaka dan penelitian terkait yang memuat tentang hasil penelitian yang pernah dilakukan yang berhubungan dengan sistem konversi energi angin yang terhubung dengan penyimpanan energi. Kajian pustaka dan penelitian terkait memuat hasil penelitian mengenai sistem konversi energi angin yang berfokus kepada beberapa aspek yang terdapat dalam sistem konversi energi angin, seperti kontrol optimal sistem konversi energi angin dan manajemen penyimpanan energi.

Pada referensi [5], dijelaskan tentang *Energy Management Systems* (EMS) pada PV menggunakan logika fuzzy. Input dari FLC berupa SOC baterai dan superkapasitor serta arus referensi dari beban. Dalam hal ini, tegangan beban dijaga konstan. Kontroler PI menghitung arus referensi dari beban agar tegangan beban konstan pada 400 V. EMS menghasilkan arus referensi baterai dan superkapasitor. Nilai dari kedua arus referensi ini diolah sedemikian rupa oleh EMS sehingga tetap menjaga tegangan beban konstan. Logika fuzzy berperan dalam menjaga SOC baterai dan superkapasitor tetap pada kondisi yang diinginkan, yaitu antara 25 % sampai 95 %. Simulasi dilakukan dengan arus keluaran PV dianggap konstan dan arus beban yang bervariasi, didapatkan tegangan beban tetap konstan.

Pada referensi [1], dipaparkan penggunaan superkapasitor sebagai penghalus daya keluaran PMSG. Pada sisi generator, terdapat penyearah 3 fasa dan pada sisi grid terdapat *inverter* 3 fasa. Superkapasitor diletakkan diantara penyearah dan inverter. Superkapasitor yang digunakan adalah Lithium Ion Capacitors (LIC). Dalam hal ini, superkapasitor dianggap ideal. Metode yang digunakan adalah metode kontrol vektor. Dengan menggunakan metode kontrol ini, dapat dilakukan kontrol secara terpisah antara torsi dan flux generator dimana besarnya torsi berbanding lurus dengan i_q dan flux dihasilkan oleh magnet yang ada di rotor. Untuk memaksimalkan daya yang dapat diambil dari angin, maka digunakan *Maximum Power Point Tracking* (MPPT). Hasil simulasi menunjukkan bahwa dengan menggunakan

metode ini, fluktuasi daya keluaran generator dapat dikurangi. Namun, tegangan beban tidak dapat dijaga konstan. Saat superkapasitor menyuplai daya, tegangan beban akan meningkat, sedangkan pada saat superkapasitor menerima daya maka tegangan beban akan turun.

Pada referensi [2], dijelaskan pengaturan daya aktif menggunakan penyimpan energi hibrida pada *Doubly Fed Induction Generator* (DFIG). Dalam paper ini, konverter bidirectional DC-DC hanya dipasang pada superkapasitor. Terdapat *Rotor Side Converter* (RSC) dan *Line Side Converter* (LSC). RSC berfungsi untuk mengontrol tegangan dan frekuensi pada sisi stator generator, sedangkan LSC berfungsi untuk mengontrol tegangan beban dan menyediakan daya reaktif untuk disalurkan ke beban jika dibutuhkan. Kontrol tegangan menggunakan pendekatan kontrol daya reaktif. Daya reaktif dapat dikontrol menggunakan komponen sumbu q dari arus stator sedangkan komponen sumbu d digunakan untuk mengatur tegangan DC Link. Metode pengaturan aliran daya antara baterai dan superkapasitor menggunakan kontroler PID dan *high pass filter* (HPF). HPF berfungsi meloloskan daya berfrekuensi tinggi untuk disuplai ke superkapasitor, sedangkan daya berfrekuensi rendah disuplai ke baterai. Hasil simulasi menunjukkan bahwa dengan menggunakan metode ini, arus charging dan discharging baterai menjadi lebih halus. Namun, penelitian pada paper ini tidak memfokuskan pada power smoothing.

Pada referensi [4], menerapkan logika fuzzy untuk pengaturan aliran daya antara baterai dan superkapasitor. Filter Kalman digunakan untuk memprediksi SOC dan SOP dari baterai dan superkapasitor. SOP akan dihitung berdasarkan nilai dari SOC. SOP ini berfungsi untuk memberikan informasi tentang kapabilitas daya puncak baterai, sehingga dapat menghindarkan baterai dan superkapasitor discharging pada arus yang besar. Dalam paper ini, digunakan dua logika fuzzy. Pada logika fuzzy pertama, terdapat tiga input, yaitu daya yang dibutuhkan oleh motor, SOC baterai dan SOC superkapasitor. Keluaran dari logika fuzzy pertama adalah daya yang harus disuplai oleh baterai. Keluaran dari logika fuzzy yang pertama ini akan menjadi salah satu masukan dari logika fuzzy yang kedua bersama dengan SOP baterai. Dua input tadi akan memperkirakan daya optimal yang harus disuplai oleh baterai ke motor. Dengan menggunakan metode ini, kestabilan dan efisiensi dari HESS dapat terjaga.

2.2 Turbin Angin

Dewasa ini, masyarakat dunia mulai menggencarkan penggunaan sumber energi alternatif karena dampak yang ditimbulkan oleh sumber energi fosil, seperti minyak bumi, batu bara, dan lain-lain dapat mencemari lingkungan dan menyebabkan kerusakan lingkungan. Selain itu, cadangan energi fosil mulai menipis sehingga diperlukan sumber energi baru dan terbarukan.

Angin merupakan salah satu energi alternatif yang dapat diperbarui. Angin menyediakan energi dalam bentuk energi kinetik. Energi kinetik dapat dikonversi menjadi energi listrik menggunakan sebuah alat bernama turbin angin yang terkopel dengan generator. Turbin angin merupakan alat untuk mengonversi energi kinetik menjadi energi mekanik yang selanjutnya diubah menjadi energi listrik oleh generator listrik. Daya mekanik yang dihasilkan oleh turbin angin besarnya berbanding lurus dengan kecepatan angin. Jika generator yang terkopel memiliki putaran tinggi maka diperlukan *gearbox* untuk menaikkan putaran turbin yang rendah, sedangkan jika digunakan generator dengan putaran rendah maka tidak diperlukan *gearbox*. Turbin angin terbagi menjadi 2 jenis berdasarkan konstruksinya, yaitu turbin angin sumbu horisontal dan sumbu vertikal.

Mayoritas komponen utama turbin angin sumbu horisontal terdapat diatas tiang penyangga. Komponen-komponen itu diantaranya adalah *blade*, rotor, dan generator. Karena konstruksinya ini, dibutuhkan tiang penyangga yang kokoh untuk menahan beban komponen-komponen yang berada diatasnya. Turbin jenis ini harus menyesuaikan arah *blade* dengan arah angin karena agar dapat berputar.

Keuntungan turbin angin sumbu horisontal adalah menghasilkan konversi energi yang lebih tinggi, dapat mengakses angin yang lebih besar dengan posisi yang lebih tinggi, dan dapat dilakukan pengaturan daya dan *pitch angle* pada kecepatan angin yang tinggi [6]. Sedangkan, beberapa kelemahan sistem turbin angin sumbu horisontal adalah membutuhkan biaya konstruksi yang besar dan membutuhkan tower yang tinggi dan kuat karena memiliki rotor poros utama dan generator listrik di puncak menara [6]. Turbin angin sumbu horisontal dapat dilihat pada Gambar 2.1.

Berbeda dengan sumbu horisontal, mayoritas komponen turbin angin sumbu vertikal berada di bawah sehingga konstruksi turbin jenis ini tidak memerlukan tiang yang kuat. Pada turbin ini, arah *blade* tidak perlu menyesuaikan dengan arah angin untuk dapat bergerak. Beberapa keuntungan turbin angin sumbu vertikal adalah biaya instalasi murah, perawatannya mudah karena diletakan dekat dengan tanah, bukan pada tempat yang tinggi, peletakkan turbin angin tidak bergantung pada arah angin, tidak membutuhkan penyangga [6]. Sedangkan, beberapa kelemahan turbin angin sumbu vertikal adalah sebagai berikut memiliki efisiensi yang lebih rendah, fluktuasi torsi lebih tinggi dan rawan terjadi vibrasi mekanik, sulit dilakukan pengaturan daya pada kecepatan angin yang tinggi [6]. Turbin angin sumbu vertikal dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.1 Turbin Angin Sumbu Horisontal



Gambar 2.2 Turbin Angin Sumbu Vertikal

Daya keluaran turbin angin dapat dihitung menggunakan persamaan (1) berikut [7] :

$$P_m = C_p (\gamma, \beta) \frac{\rho A}{2} V_{\text{wind}}^3 \dots (1)$$

dengan P_m adalah daya mekanik keluaran turbin angin (W), C_p adalah koefisien performa turbin angin, ρ adalah kerapatan udara (kg/m^3), R adalah radius dari *blade* (m), A adalah luas permukaan turbin (m^2), V_{wind} adalah kecepatan angin (m/s), γ adalah *tip speed ratio*, dan β adalah *pitch angle* (deg). Koefisien performa (C_p) merupakan tolak ukur efisiensi turbin angin. Semakin tinggi nilai C_p maka efisiensi turbin angin juga makin tinggi. Nilai C_p maksimal adalah 0,48. Nilai itu diraih pada saat β bernilai 0 dan γ bernilai 8,1.

2.3 Permanent Magnet Synchronouos Generator

Permanent Magnet Synchronouos Generator, atau yang biasa disebut PMSG, merupakan mesin listrik yang merubah energi mekanik menjadi energi listrik. Cara kerja PMSG pada dasarnya sama dengan generator sinkron, perbedaannya terletak pada rotor. Jika pada generator sinkron menggunakan belitan untuk menghasilkan medan magnet, pada PMSG menggunakan permanen magnet untuk menghasilkan medan magnet. Beberapa keuntungan dari PMSG adalah tidak memiliki sikat dan *slip ring*, tidak memerlukan eksitasi yang berasal dari luar generator sehingga tidak terdapat rugi-rugi tembaga pada rangkaian rotor, biaya perawatannya cenderung rendah, dan apabila terdapat gangguan pada grid tidak mempengaruhi generator secara langsung karena amplitudo dan frekuensi tegangannya dikontrol penuh oleh konverter daya [6].

PMSG juga memiliki beberapa kelemahan, yaitu bahan permanen magnet cenderung mahal, proses fabrikasi yang rumit, sangat bergantung pada konverter daya, karena semua daya yang dihasilkan harus melalui konverter daya, dan memiliki rugi-rugi yang tinggi pada rangkaian elektronika [6].

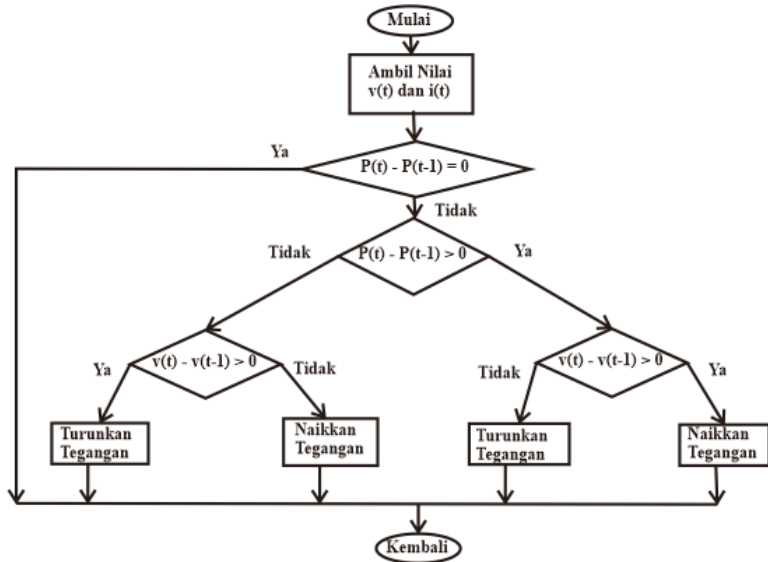
2.4 Maximum Power Point Tracking (MPPT)

MPPT adalah sebuah algoritma yang berfungsi untuk mengoptimalkan daya keluaran dari sebuah pembangkit listrik yang daya masukannya bersifat fluktuatif. Algoritma ini sudah banyak digunakan

pada sistem PV (*photovoltaic*) dan turbin angin. MPPT memiliki beberapa variasi algoritma, salah satunya adalah *Perturb and Observe*. Algoritma ini memonitor daya keluaran sebagai hasil kali antara tegangan dan arus. Dalam kasus turbin angin, yang dimonitor adalah tegangan terminal generator dan arus fasa. Torsi dan kecepatan dari PMSG berbanding lurus dengan arus dan tegangannya sehingga jika tegangan terminal PMSG berubah maka kecepatannya ikut berubah [8]. Merubah tegangan keluaran dapat dilakukan dengan merubah *duty cycle* dari konverter boost.

Dalam mendesain sebuah MPPT, hal yang harus diperhatikan adalah nilai perubahan dari *duty cycle*. Nilai perubahan adalah besarnya nilai kenaikan atau penurunan dari *duty cycle* (ΔD). Jika nilai perubahan terlalu besar, maka sistem akan dengan cepat mencapai titik maksimal, namun osilasi pada titik maksimal akan besar sehingga rugi - rugi juga besar. Sebaliknya, jika nilai perubahan terlalu kecil, maka sistem membutuhkan waktu yang cukup lama untuk mencapai titik maksimal, namun osilasi pada titik maksimal nantinya akan kecil sehingga rugi - rugi juga kecil. Maka dari itu, pemilihan nilai perubahan harus dilakukan secara cermat. Algoritma *Perturb and Observe* dapat dilihat pada Gambar 2.3.

Jika $dP/dV > 0$ maka sistem mendekati MPP (*Maximum Power Point*) sedangkan jika $dP/dV < 0$ maka sistem menjauhi MPP, serta jika $dP/dV \approx 0$ maka sistem beresilasi pada titik MPP [8]. Ketika $dP > 0$ dan $dV > 0$, yang artinya daya dan tegangan mengalami kenaikan, maka *duty cycle* harus dinaikkan terus sehingga sistem mendekati MPP. Ketika $dP > 0$ dan $dV < 0$, yang artinya daya naik namun tegangan turun, maka *duty cycle* harus diturunkan agar sistem mendekati MPP. Ketika $dP < 0$ dan $dV < 0$, yang artinya daya dan tegangan turun, maka *duty cycle* harus dinaikkan. Ketika $dP < 0$ dan $dV > 0$, yang artinya daya turun sedangkan tegangannya naik, maka *duty cycle* harus diturunkan.



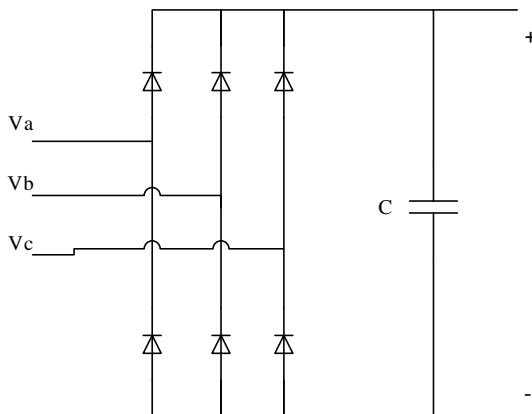
Gambar 2.3 Algoritma *Perturb and Observe*

2.5 Penyearah 3 Fasa

Penyearah merupakan alat konversi sinyal AC (*Alternating Current*) menjadi DC (*Direct Current*). Penyearah terbagi menjadi dua jenis, yaitu penyearah 1 fasa dan penyearah 3 fasa. Penyearah 3 fasa memiliki beberapa jenis, yaitu penyearah 3 pulsa, penyearah 6 pulsa, dan penyearah 12 pulsa. Selain itu, berdasarkan jenis saklar yang digunakan, penyearah 3 fasa terbagi menjadi penyearah tak terkontrol, terkontrol semi, dan terkontrol penuh.

Penyearah 6 pulsa disebut tidak terkontrol apabila 6 buah saklarnya merupakan dioda, disebut terkontrol semi apabila masing-masing lengan fasa terdiri dari 1 diode dan 1 thyristor, dan disebut terkontrol penuh apabila semua saklarnya adalah thyristor. Pada penyearah 6 pulsa tidak terkontrol, 3 dioda akan menghasilkan gelombang tegangan positif sedangkan 3 dioda lainnya akan menghasilkan gelombang tegangan negatif pada sisi output dc. Jika bentuk gelombang ini disetarakan dengan tegangan dc pada umumnya,

yaitu bernilai nol pada polaritas negatif maka akan terbentuk 6 puncak gelombang pada polaritas positif dengan lebar tiap puncak adalah 60° sehingga batas-batas kurva kuadram pertama adalah 60° dan 120° . Penyearah 3 fasa tidak terkontrol dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Penyearah 6 Pulsa Tak Terkontrol

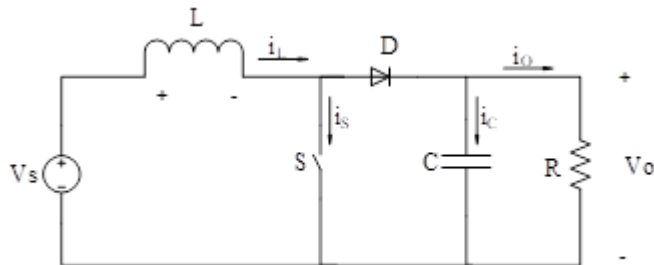
Nilai amplitudo penyearah 6 pulsa adalah harga maksimum tegangan fasa ke fasa. Tegangan dc rata-rata merupakan luasan gelombang tegangan. Pada penyearah 6 pulsa terkontrol semi dan penuh, penyalan thyristor dapat ditunda melalui sudut penyalan α . Sudut penyalan tersebut dapat mengatur tegangan keluaran dc rata-rata. Jika digunakan tegangan fasa ke tanah sebagai dasar perhitungan, maka tegangan keluaran rata-rata pada mode CCM (*Continuous Current Mode*) dapat dilihat pada persamaan (2) berikut :

$$V_{avg} = \frac{3\sqrt{3}V_{max-LN}}{\pi} \cos \alpha \dots (2)$$

dengan V_{avg} adalah tegangan dc rata-rata (Volt), V_{max-LN} adalah tegangan fasa ke tanah maksimal (Volt), dan α adalah sudut penyalan (derajat).

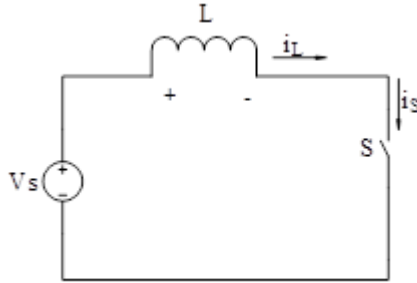
2.6 Boost Converter

Konverter dc-dc merupakan alat untuk mengonversi tegangan dc menjadi tegangan dc dengan nilai tertentu. Ada tiga jenis konverter dc-dc, yaitu konverter buck, konverter boost, dan konverter buck-boost. Konverter buck berfungsi untuk menghasilkan tegangan dc yang lebih rendah daripada tegangan dc masukannya. Konverter boost berfungsi untuk menghasilkan tegangan dc yang lebih besar daripada tegangan dc masukannya. Konverter buck-boost berfungsi untuk menghasilkan tegangan dc yang lebih rendah atau tinggi daripada tegangan dc masukannya. Gambar 2.5 menunjukkan rangkaian konverter boost.

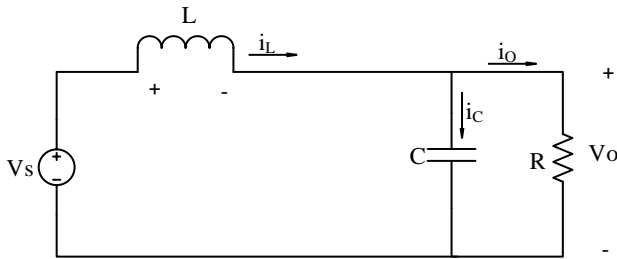


Gambar 2.5 Rangkaian Konverter Boost

Konverter boost bekerja pada dua kondisi, yaitu mode pengisian arus induktor (saat saklar S konduksi) dan mode pengosongan arus induktor (saat saklar S padam). Saat saklar S konduksi, induktor L akan dihubungsingkat dengan tegangan sumber (V_s) dan tegangan keluaran (V_o) akan berharga nol. Pada saat saklar S padam, tegangan sumber (V_s) akan terhubung seri dengan induktor dan beban. Induktor akan berubah dari mode pengisian arus menjadi mode pengosongan arus, sehingga beban akan dicatu oleh dua sumber, yaitu V_s dan V_L (tegangan induktor). Kondisi ini yang menyebabkan tegangan keluaran (V_o) selalu lebih besar daripada tegangan sumber (V_s). Rangkaian konverter saat kondisi saklar konduksi dan padam dapat dilihat pada Gambar 2.6.



(a)



(b)

Gambar 2.6 Kondisi saat Saklar S konduksi (a) dan Padam (b)

Tegangan keluaran konverter boost dapat dilihat pada persamaan (3) berikut :

$$V_o = \frac{V_s}{1-D} \dots\dots (3)$$

dengan V_o adalah tegangan keluaran (Volt), V_s adalah tegangan sumber (Volt), dan D adalah *duty cycle*.

Dalam mendesain sebuah konverter boost, nilai induktor (L) dan (C) harus diperhatikan baik-baik. Nilai L dan C yang tepat dapat menjaga riak arus dan tegangan pada level yang diinginkan. Nilai induktor dan kapasitor dapat dihitung dengan persamaan (4) dan (5) berikut :

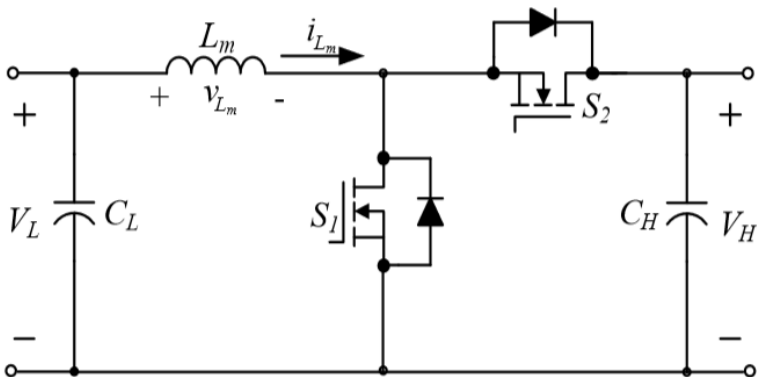
$$L = \frac{V_s \cdot t_{on}}{\Delta i} \dots\dots (4)$$

$$C = \frac{V_o \cdot D}{R \cdot \Delta V \cdot f} \dots (5)$$

dengan L adalah induktor (H), t_{on} adalah lamanya saklar menyala (s), Δi adalah besar riak arus (A), C adalah kapasitor (F), D adalah *duty cycle*, R adalah resistor konverter (Ohm), ΔV adalah besar riak tegangan (V), f adalah frekuensi pensaklaran (Hz).

2.7 Bidirectional DC-DC Converter

Konverter bidirectional adalah konverter yang arah aliran dayanya dua arah. Konverter ini dapat digunakan untuk mengatur aliran daya secara dua arah, baik dalam mode boost maupun buck. Kontrol dari bidirectional converter ada 2 jenis, yaitu kontrol tegangan dan arus. Kontrol tegangan menggunakan tegangan keluaran sebagai umpan balik. Kontrol tegangan ini memiliki kelemahan, yaitu respon yang lambat dan kestabilan sistem yang kurang bagus [9]. Kontrol arus menggunakan 2 umpan balik, yaitu umpan balik tegangan keluaran dan arus. Kontrol arus memiliki beberapa keuntungan, yaitu stabilitas sistem bagus, respon yang cepat, dan karakteristik dinamis yang bagus [9]. Rangkaian konverter bidirectional ditunjukkan pada Gambar 2.7 berikut :



Gambar 2.7 Rangkaian Konverter DC-DC Bidirectional

Pada mode boost, saklar yang bekerja adalah S_2 sedangkan S_1 selalu berada pada kondisi padam. Saat saklar S_2 konduksi maka induktor

akan dihubungkan dengan sumber V_s sehingga induktor akan berada pada kondisi pengisian arus. Pada saat saklar S2 padam, tegangan sumber V_s akan terhubung seri dengan induktor dan beban melalui dioda D1. Induktor akan berubah dari mode pengisian arus menjadi mode pengosongan arus, sehingga beban akan dicatu oleh dua sumber, yaitu V_s dan V_L .

Pada mode buck, saklar yang bekerja adalah S1 sedangkan saklar S2 selalu berada pada kondisi padam. Pada saat saklar S1 konduksi maka arus akan mengalir ke induktor dan beban (sisi tegangan rendah). Pada kondisi ini terjadi pengisian arus induktor. Pada saat saklar S1 padam, maka induktor akan menjadi sumber arus yang terhubung dengan beban melalui dioda D2. Pada kondisi ini, induktor mengalami pengosongan arus.

Parameter konverter bidirectional, yaitu L , C_H , dan C_L dapat dicari menggunakan persamaan (6), (7), dan (8) berikut [10]:

$$L \geq \frac{D (1-D)^2 V_H^2}{2 P_H F_s} \dots (6)$$

$$C_L = \frac{(1-D)}{8 \left(\frac{\Delta V_L}{V_L} \right) L F_s^2} \dots (7)$$

$$C_H = \frac{D}{R_H F_s \left(\frac{\Delta V_H}{V_H} \right)} \dots (8)$$

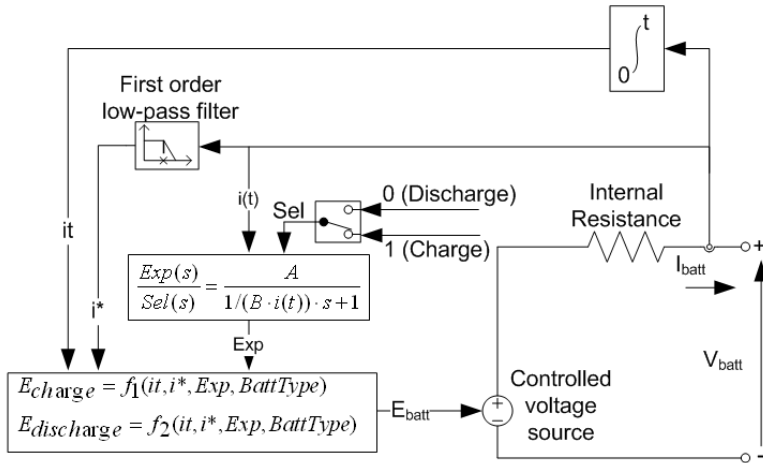
dengan L adalah induktor (H), C_L adalah kapasitor tegangan rendah (F), C_H adalah kapasitor tegangan tinggi (F), D adalah *duty cycle*, V_H adalah tegangan pada sisi tegangan tinggi (V), P_H adalah daya pada sisi tegangan tinggi (W), F_s adalah frekuensi pensaklaran (Hz), V_L adalah tegangan pada sisi tegangan rendah (V), R_H adalah resistansi pada sisi tegangan tinggi (Ohm), ΔV_H adalah riak pada sisi tegangan tinggi (V), dan ΔV_L adalah riak pada sisi tegangan rendah (V).

2.8 Baterai

Baterai merupakan salah satu penyimpan energi yang paling banyak digunakan. Penggunaan baterai bukan hanya pada penyimpan energi hibrida saja, namun juga diaplikasikan dalam kehidupan sehari-hari, misalnya pada telepon genggam, laptop, dan lain-lain. Baterai

memiliki keunggulan, yaitu memiliki kerapatan energi yang tinggi [2]. Ini berarti baterai dapat menyuplai daya dalam waktu yang cukup lama. Namun, baterai juga memiliki kelemahan, yaitu memiliki kerapatan daya yang rendah [5]. Ini berarti baterai tidak mampu menyuplai daya besar dalam waktu singkat. Selain itu, karena baterai tersusun dari bahan-bahan kimia, maka baterai rentan akan kerusakan.

Baterai merubah energi kimia menjadi energi listrik melalui reaksi redoks. Reaksi redoks ini bergantung pada jenis material yang digunakan, misalnya seperti Zn, Li, Alkaline, dan lain-lain. Material yang memiliki e reduksi lebih besar akan berperan sebagai katoda (+) dan yang lebih kecil berperan sebagai anoda (-). Pada katoda terjadi reaksi reduksi dan pada anoda terjadi reaksi oksidasi. Pada umumnya baterai terdiri dari beberapa sel volta. Satu sel terdiri dua bagian, yaitu elektroda positif (katoda) dengan elektrolitnya dan elektroda negatif (anoda) dengan elektrolitnya. Tegangan terminal sel adalah selisih tegangan antara elektroda positif dan negatif. Rangkaian ekivalen baterai ditunjukkan dalam Gambar 2.8 berikut :



Gambar 2.8 Rangkaian Ekivalen Baterai [11]

dengan E_{batt} adalah tegangan nonlinear (V), I_{batt} adalah arus baterai (A), E_o adalah konstanta tegangan (V), $Exp(s)$ adalah zona eksponensial dinamis (V), $Sel(s)$ adalah mode baterai, $Sel(s)$ bernilai 0 untuk mode

pengosongan dan bernilai 1 untuk mode pengisian, K adalah konstanta polarisasi (Ah^{-1}) atau resistansi polarisasi (Ohm), i^* adalah arus frekuensi rendah (A), i adalah arus baterai (A), $i(t)$ adalah kapasitas terpakai (Ah), Q adalah kapasitas maksimal baterai (Ah), A adalah tegangan eksponensial (V), dan B adalah kapasitas eksponensial (Ah)⁻¹

Fungsi pengisian ($i^* < 0$) dan pengosongan ($i^* > 0$) baterai tergantung pada jenis baterai. Untuk baterai jenis asam timbal, fungsi pengisian (f_1) dan pengosongan (f_2) adalah sebagai berikut [12]:

$$f_1(i, i^*, i, \text{Exp}) = E_o - K \cdot \frac{Q}{Q - i^*} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - i^*} \cdot i + \text{Laplace}^{-1} \left(\frac{\text{Exp}(s)}{\text{sel}(s)}, 0 \right) \dots (9)$$

$$f_2(i, i^*, i, \text{Exp}) = E_o - K \cdot \frac{Q}{Q - i^*} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - i^*} \cdot i + \text{Laplace}^{-1} \left(\frac{\text{Exp}(s)}{\text{sel}(s)} \cdot \frac{1}{s} \right) \dots (10)$$

Pada baterai terdapat fenomena hysteresis. Fenomena inilah yang menyebabkan tegangan pada baterai menjadi eksponensial baik pada kondisi pengisian maupun pengosongan. Fenomena hysteresis ini diwakili oleh fungsi transfer $\text{Exp}(s)$ pada persamaan diatas. SOC (*State of Charge*) dari baterai dapat dihitung menggunakan persamaan (11) berikut [12]:

$$\text{SOC} = 100 \left(1 - \frac{1}{Q} \int_0^t i(t) dt \right) \dots (11)$$

2.9 Supercapasitor

Penggunaan superkapasitor masih belum seluas penggunaan baterai. Salah satu penyebabnya adalah harga. Supercapasitor memiliki harga yang lebih mahal dibandingkan dengan baterai. Namun, superkapasitor memiliki keunggulan yang tidak dimiliki oleh baterai, yaitu kerapatan daya yang tinggi [3]. Ini memungkinkan superkapasitor untuk menyuplai daya besar dalam waktu yang relatif singkat.

Supercapasitor terdiri dari 2 plat elektroda yang dipisahkan oleh membran ion permeabel secara mekanik dan sebagai dielektriknya digunakan cairan elektrolit. Elektrolit adalah campuran ion positif dan negatif yang terlarut dalam sebuah larutan seperti air. Ketika superkapasitor diberi sumber tegangan, maka akan timbul fenomena lapisan pada kedua plat elektroda. Lapisan ini muncul karena ada 2 zat berbeda, dalam hal ini elektrolit (cair) dan elektroda (padat), yang saling bersentuhan (adhesi) [13]. Lapisan ini memiliki polaritas yang

berkebalikan dengan polaritas elektrodanya. Fenomena inilah yang menyebabkan superkapasitor sering disebut juga sebagai *Electric Double Layer Capacitor* (EDLC).

Saat superkapasitor diberi sumber tegangan dc, maka akan timbul lapisan pada masing-masing elektroda dengan polaritas yang berkebalikan dengan polaritas elektrodanya. Lapisan ini adalah molekul air yang terabsorpsi ke permukaan elektroda karena fenomena adhesi. Molekul air yang bersifat dielektrik ini disebut dengan *Inner Helmholtz Plane* (IHP). Pada *Outer Helmholtz Plane* (OHP), terdapat ion negatif yang berasal dari elektrolit. Pada superkapasitor tidak ada perpindahan muatan antara elektroda dan elektrolit sehingga tidak terjadi reaksi kimia [13]. Ikatan pada lapisan disebabkan oleh fenomena elektrostatik sehingga pada lapisan timbul medan listrik.

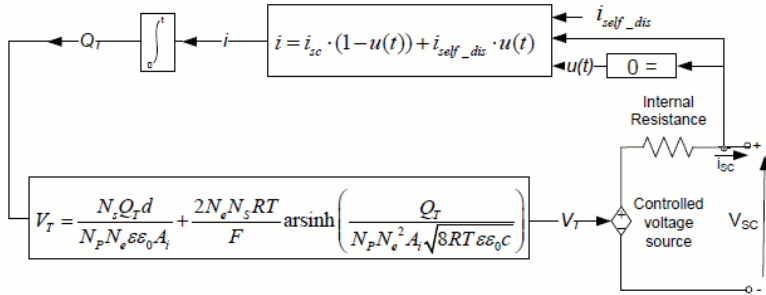
Kapasitansi, energi, dan daya superkapasitor ditunjukkan pada persamaan (12), (13), dan (14) berikut [14]:

$$C = (\epsilon_0 \epsilon_r A) / d \dots (12)$$

$$W = 0.5 C V^2 / 3600 \text{ (Wh)} \dots (13)$$

$$P_{\max} = [V^2 / 4 ESR] \text{ (W)} \dots (14)$$

dengan ϵ_0 adalah permittivitas ruang hampa, ϵ_r adalah permittivitas relatif material dielektrik, A adalah luas penampang elektroda, d adalah jarak antar 2 plat elektroda, W adalah energi (Wh), C adalah kapasitansi superkapasitor (F), V adalah tegangan kerja superkapasitor (V), Pmax adalah daya maksimal superkapasitor (W), dan ESR adalah resistansi ekuivalen superkapasitor (Ohm). Pada kasus EDLC, sebuah superkapasitor memiliki 2 buah kapasitor (2 buah lapisan) yang mempunyai jarak d. Jarak d ini nilainya sangat kecil sehingga kapasitansi superkapasitor menjadi sangat besar. Rangkaian ekivalen superkapasitor ditunjukkan dalam Gambar 2.9 berikut [15]:



Gambar 2.9 Rangkaian Ekvivalen Superkapasitor

dengan A_i adalah luas permukaan antara elektroda dan elektrolit (m^2), c adalah konsentrasi molar ($mol\ m^{-3}$), F adalah konstanta Faraday, I_{sc} adalah arus superkapasitor (A), V_{sc} adalah tegangan superkapasitor (V), C_T adalah total kapasitansi (F), R_{sc} adalah total resistansi internal (Ohm), N_e adalah jumlah layer elektroda, N_A adalah konstanta Avogadro, N_p adalah jumlah superkapasitor terhubung paralel, N_s adalah jumlah superkapasitor terhubung seri, Q_T adalah muatan listrik (C), R adalah konstanta gas ideal, d adalah radius molekular, T adalah suhu (K), ϵ adalah permittivitas material, i_{self_dis} adalah arus pengosongan alami superkapasitor (A) dan ϵ_0 adalah permittivitas ruang hampa.

SOC (*State of Charge*) dari superkapasitor dapat dihitung menggunakan persamaan berikut [15]:

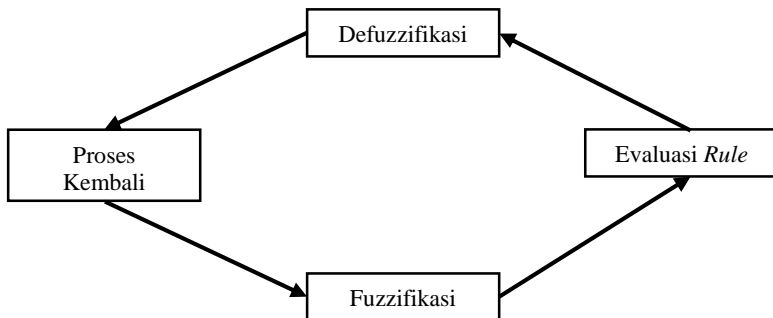
$$SOC = \frac{Q_{init} - \int_0^t I_{sc}(t) dt}{QT} \dots (15)$$

dengan Q_{init} adalah muatan awal superkapasitor.

2.10 Logika Fuzzy

Berbeda dengan metode kontrol lainnya, metode fuzzy menawarkan sesuatu yang tidak matematis. Maksudnya adalah metode ini tidak membutuhkan model matematika untuk memecahkan suatu masalah. Zadeh, pencetus logika fuzzy, mengatakan bahwa jika tingkat kerumitan suatu sistem meningkat maka kemampuan seseorang dalam membuat pernyataan yang tepat dan signifikan tentang perilaku sistem

akan menurun drastis [16]. Proses logika fuzzy ada 3 tahap, yaitu fuzzifikasi, evaluasi, dan defuzzifikasi. Fuzzifikasi adalah proses dimana masukan yang berupa himpunan pasti dirubah menjadi input fuzzy. Proses ini menghasilkan fungsi keanggotaan. Fungsi keanggotaan ini berisi himpunan-himpunan pasti yang sudah ditentukan derajat kefuzziannya. Fungsi keanggotaan memiliki 2 sumbu, yaitu sumbu horisontal dan vertikal. Sumbu horisontal menyatakan himpunan pasti, sedangkan sumbu vertikal menyatakan derajat kefuzzian dengan nilai minimal adalah nol dan maksimal adalah satu. Proses logika fuzzy ditunjukkan dalam Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Proses Logika Fuzzy

Setelah proses fuzzifikasi selesai, maka proses selanjutnya adalah evaluasi aturan *if-then*. Aturan ini berisi sebab akibat dari suatu proses. Aturan ini menghubungkan antara input fuzzy dengan keluaran fuzzy. Misalnya, jika suhunya tinggi, maka kipas angin akan menyala dan jika suhunya rendah maka kipas angin akan mati. Secara garis besar, dapat ditulis *if* (masukan), *then* (keluaran).

Proses terakhir adalah defuzzifikasi. Proses ini merubah output fuzzy hasil aturan *if-then* menjadi keluaran pasti. Keluaran ini yang akan diterima oleh sistem. Dalam menggunakan logika fuzzy, pengalaman akan sangat berpengaruh. Seseorang dengan pengalaman tinggi akan dengan mudah menetapkan nilai-nilai fungsi keanggotaan sedemikian rupa sehingga keluaran yang dihasilkan sesuai dengan yang diinginkan.

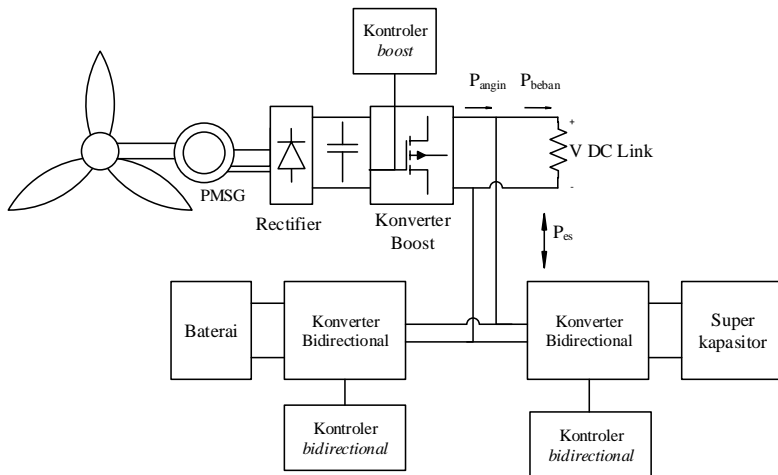
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 3

PEMODELAN SISTEM

3.1 Konfigurasi Sistem Konversi Energi Angin

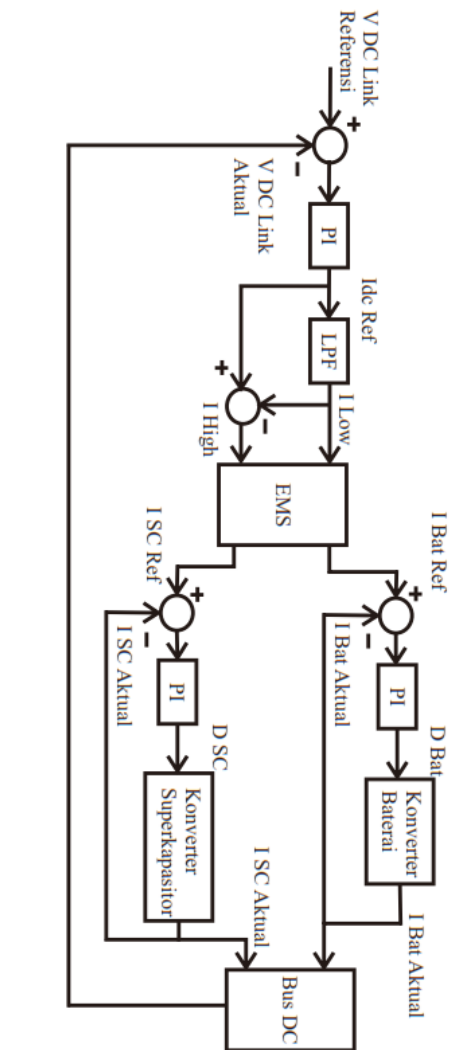
Sistem konversi energi angin yang digunakan dalam Tugas Akhir ini terdiri dari beberapa komponen, yaitu turbin angin, *permanent magnet synchronous generator* (PMSG), penyearah 3 fasa, konverter boost, beban resistif, konverter bidirectional, baterai, dan superkapasitor. Keseluruhan sistem dapat dilihat pada Gambar 3.1 dibawah ini.



Gambar 3.1 SKEA dengan Penyimpan Energi Hibrida

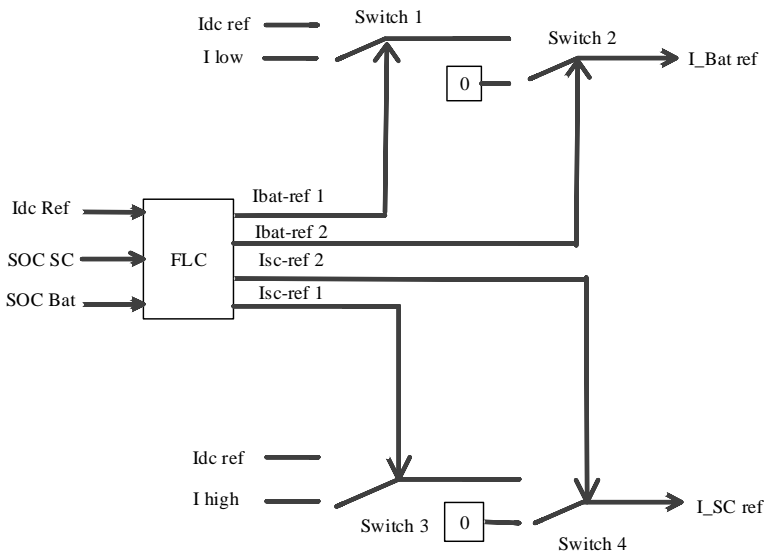
3.2 Energy Management Systems (EMS)

Dengan adanya baterai dan superkapasitor, maka diperlukan pengaturan aliran daya antara keduanya. Pengaturan aliran daya ini harus memperhitungkan *Stage of Charge* (SOC) dari baterai dan superkapasitor. Dari SOC ini, kita dapat menentukan waktu pengisian dan pengosongan dari baterai dan superkapasitor. Selain SOC, hal yang diperhatikan lainnya adalah perubahan daya generator. Skema EMS dapat dilihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Skema Kontrol Tegangan DC Link

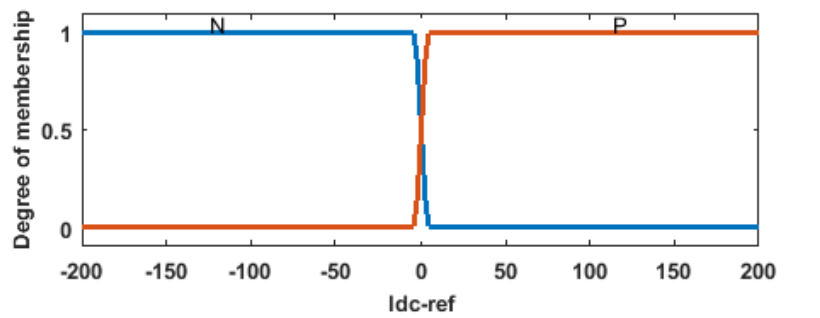
Kontroler tegangan menggunakan kontroler PI. Nilai $K_p = 80$ dan $K_i = 80$ didapat dari *trial and error*. *Low Pass Filter* yang digunakan memiliki *time constant* sebesar 3 sekon atau sama dengan frekuensi *cut off* sebesar 0,05 Hz. *Energy Management Systems* (EMS) menggunakan logika fuzzy. Logika fuzzy bertugas untuk menjaga SOC baterai dan superkapasitor tetap pada kondisi yang diinginkan dengan cara memberikan sinyal perintah kepada saklar agar membuka ataupun menutup. Batas atas dari SOC adalah 95 % dan batas bawah sebesar 25 %. Baterai dan superkapasitor tidak boleh mengisi jika SOC sudah mencapai 95 % dan tidak boleh mengosongkan jika SOC sudah mencapai 25 %. Skema logika fuzzy dapat dilihat pada Gambar 3.3.



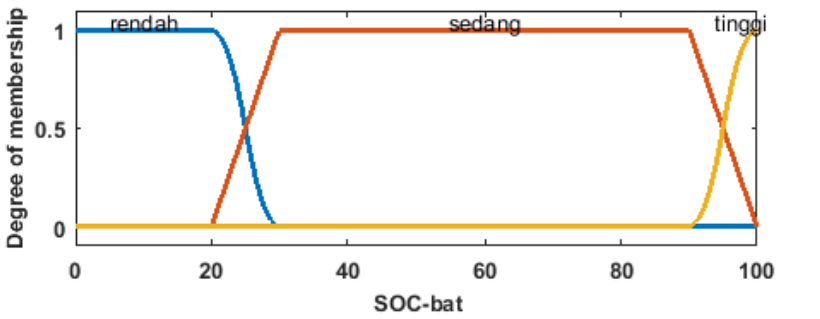
Gambar 3.3 Skema *Energy Management Systems*

FLC mempunyai 3 masukan dan 4 keluaran. Masukan terdiri dari arus referensi (*idc ref*), SOC baterai (*SOC bat*), dan SOC superkapasitor (*SOC SC*). *Idc ref* terdiri dari positif dan negatif, SOC baterai dan superkapasitor terdiri dari kecil, sedang, dan besar. Keluaran logika fuzzy terdiri dari *Ibat-ref 1*, *Ibat-ref 2*, *Isc-ref 1*, dan *Isc-ref 2*. *Ibat-ref 1* bertugas mengontrol buka tutup dari saklar 1, *Ibat-ref 2* mengontrol

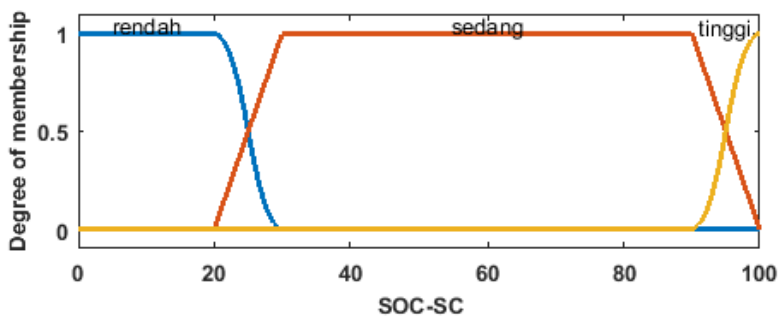
saklar 2, Isc-ref 1 mengontrol saklar 3, dan Isc-ref 2 mengontrol saklar 4. Semua keluaran terdiri dari positif dan negatif. Masukan dan keluaran dari fuzzy dapat dilihat pada Gambar 3.4 sampai dengan Gambar 3.10.



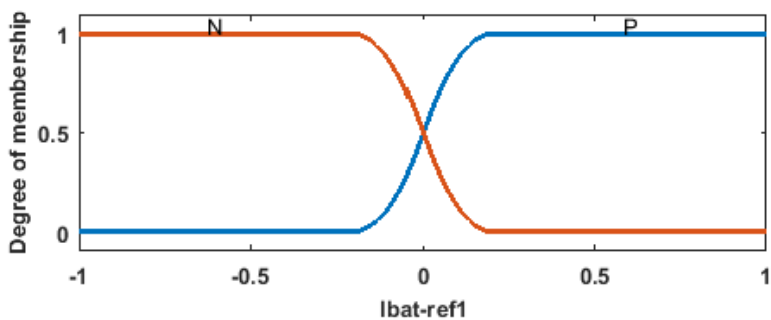
Gambar 3.4 Fungsi keanggotaan Idc-ref



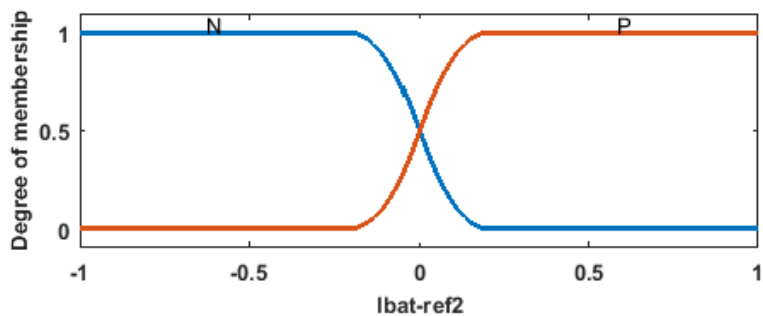
Gambar 3.5 Fungsi Keanggotaan SOC Baterai



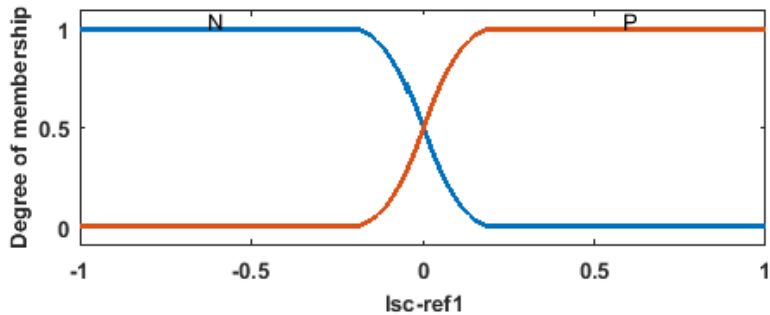
Gambar 3.6 Fungsi Keanggotaan SOC Superkapasitor



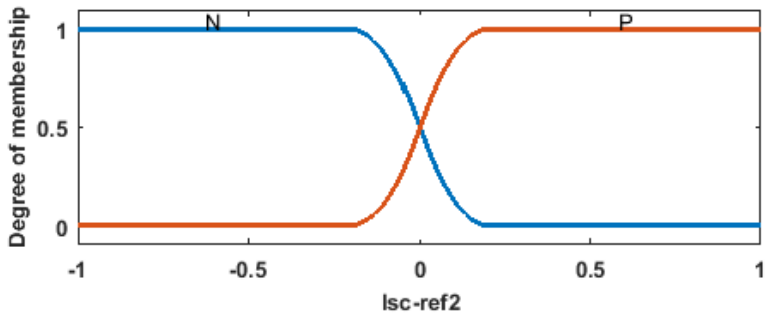
Gambar 3.7 Fungsi Keanggotaan ibat-ref 1



Gambar 3.8 Fungsi Keanggotaan ibat-ref 2



Gambar 3.9 Fungsi Keanggotaan isc-ref 1



Gambar 3.10 Fungsi Keanggotaan isc-ref 2

Setelah membuat fungsi keanggotaan, maka langkah selanjutnya adalah membuat aturan *if – then*. Aturan ini menghubungkan input dengan output. Aturan *if – then* untuk tugas akhir ini dapat dilihat dalam tabel berikut ini.

Tabel 3.1 Rules Ibat-ref 1

Ibat-ref 1		SOC SC		
		Rendah	Sedang	tinggi
Idc ref	N	N	N	P
	P	P	N	N

Tabel 3.2 *Rules* Ibat-ref 2

Ibat-ref 2		SOC Bat		
		Rendah	Sedang	tinggi
Idc ref	N	P	P	N
	P	N	P	P

Tabel 3.3 *Rules* Isc-ref 1

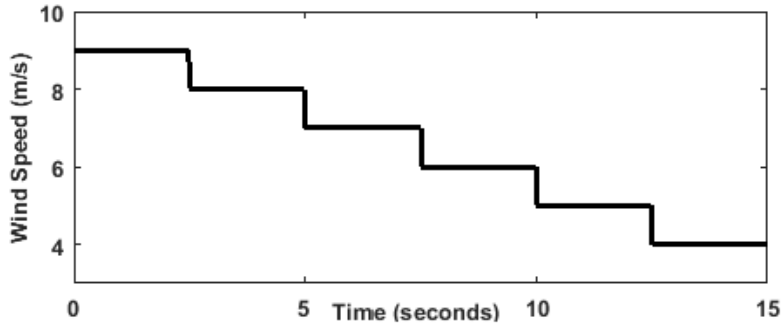
Isc-ref 1		SOC Bat		
		Rendah	Sedang	tinggi
Idc ref	N	N	N	P
	P	P	N	N

Tabel 3.4 *Rules* Isc-ref 2

Isc-ref 2		SOC SC		
		Rendah	Sedang	tinggi
Idc ref	N	P	P	N
	P	N	P	P

3.3 Kecepatan Angin

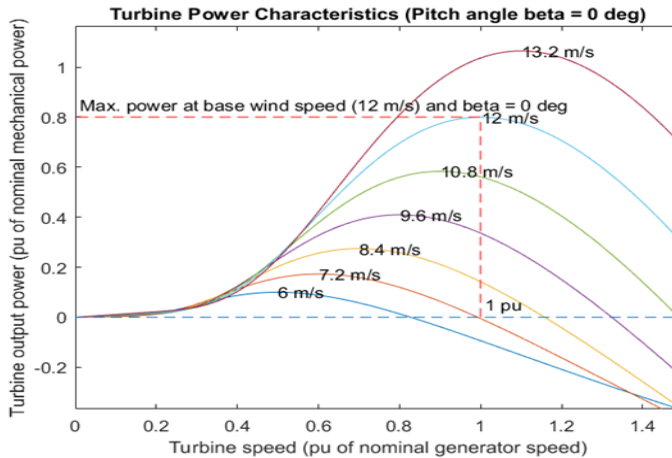
Kecepatan angin sangat menentukan daya keluaran dari turbin angin. Perbedaan kecil pada kecepatan angin dapat menghasilkan perbedaan daya keluaran turbin yang besar. Selain itu, kecepatan angin juga berubah-ubah yang menyebabkan daya keluaran turbin angin juga berubah-ubah. Pada sub bab ini, kecepatan angin dimodelkan dengan perubahan konstan dari 9 m/s menuju 4 m/s. Grafik kecepatan angin ditunjukkan oleh gambar dibawah ini.



Gambar 3.11 Kecepatan Angin

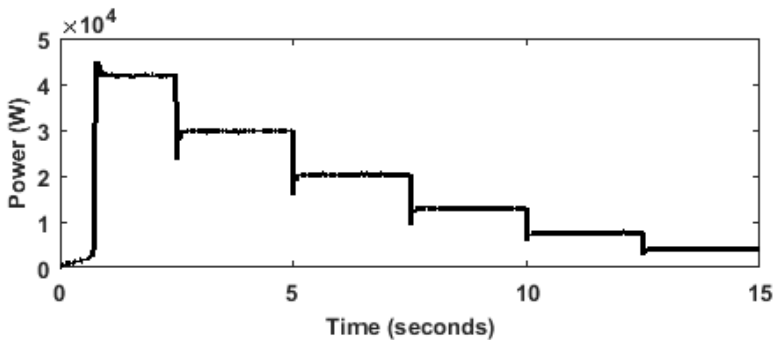
3.4 Model Turbin Angin dan PMSG

Sistem turbin angin yang digunakan dalam Tugas Akhir ini memiliki peralatan pembangkit utama yang berupa turbin angin dan PMSG. Turbin angin yang dihubungkan ke PMSG termasuk kedalam sistem pengaturan langsung, yang berarti turbin angin yang terhubung dengan PMSG tidak menggunakan *gearbox*. Jenis turbin angin yang digunakan adalah turbin angin sumbu horisontal dengan mode operasi kecepatan berubah, yang berarti dioperasikan dengan kecepatan angin yang bervariasi. Kurva karakteristik turbin angin dapat dilihat pada Gambar 3.12.

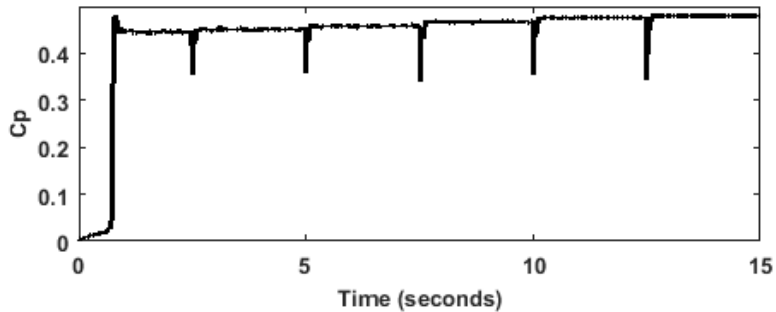


Gambar 3.12 Kurva Karakteristik Turbin Angin

Turbin angin kemudian diuji menggunakan model kecepatan angin yang sudah dijelaskan sebelumnya. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui apakah turbin sudah bekerja secara optimum atau belum dengan cara melihat koefisien performanya (C_p). Daya keluaran turbin angin dan C_p dapat dilihat pada Gambar 3.13 dan Gambar 3.14.



Gambar 3.13 Daya Keluaran Turbin Angin



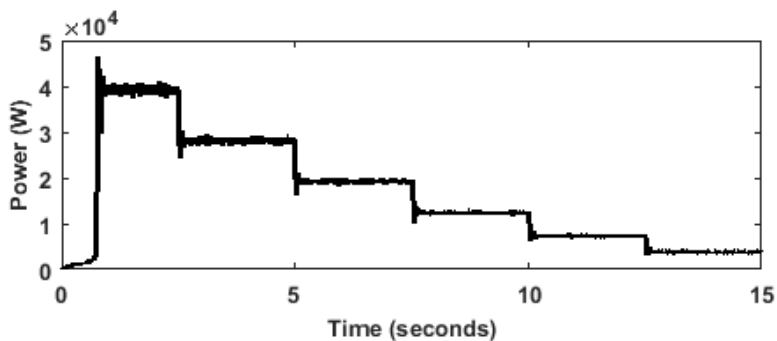
Gambar 3.14 Koefisien Performa (C_p) Turbin Angin

Parameter PMSG yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 3.5 berikut [17]:

Tabel 3.5 Parameter PMSG

Daya keluaran	40 kW
Induktansi sumbu d, L_d	0,000635 H
Induktansi sumbu q, L_q	0,000635 H
Kecepatan	314 rad/s
Flux permanen magnet	0,192 Wb
Pasangan pole	2
Total inersia turbin dan generator	0,011 kg.m ²
Total viscous friction turbin dan generator	0,001889 N.m.s

Kemudian PMSG akan diuji guna memverifikasi model PMSG yang digunakan. Dari pengujian ini akan didapatkan efisiensi PMSG dengan cara membandingkan daya keluaran PMSG dengan daya keluaran turbin angin yang bertindak sebagai daya masukan dari PMSG. Daya keluaran PMSG ditunjukkan pada Gambar 3.15 dan efisiensi PMSG ditunjukkan oleh Tabel 3.6.



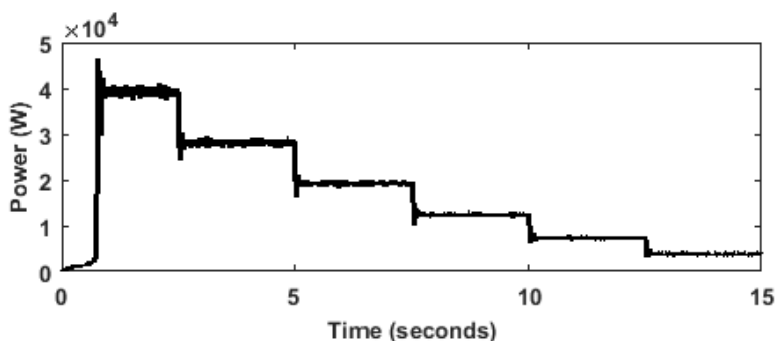
Gambar 3.15 Daya Keluaran PMSG

Tabel 3.6 Efisiensi PMSG

No .	Kecepatan Angin (m/s)	Daya Turbin (W)	Daya PMSG (W)	Efisiensi (%)
1	4	3957	3938	99,519
2	5	7672	7584	98,852
3	6	12960	12670	97,762
4	7	20260	19770	97,581
5	8	30120	28570	94,853
6	9	41890	40560	96,825

3.5 Model Penyearah 3 Fasa

Penyearah 3 fasa yang digunakan adalah penyearah tak terkontrol 6 pulsa. Semua semikonduktor yang digunakan adalah dioda. Untuk mengetahui verifikasi model dari penyearah dioda tiga fasa dalam sistem konversi energi angin, penyearah ini akan diuji berdasarkan kecepatan angin yang telah dijelaskan pada sub-bab sebelumnya. Hasil simulasi penyearah ditunjukkan pada Gambar 3.16 berikut.



Gambar 3.16 Daya Keluaran Penyearah 3 Fasa

Setelah mengetahui daya keluaran penyearah, dapat dihitung efisiensi dari penyearah dengan membandingkannya dengan daya keluaran PMSG yang bertindak sebagai daya masukan penyearah. Efisiensi penyearah disajikan dalam Tabel 3.7 berikut.

Tabel 3.7 Efisiensi Penyearah 3 Fasa

No.	Kecepatan Angin (m/s)	Daya PMSG (W)	Daya Rectifier (W)	Efisiensi (%)
1	4	3938	3907	99,212
2	5	7584	7534	99,340
3	6	12670	12310	97,158
4	7	19770	19180	97,015
5	8	28570	27840	97,444
6	9	40560	39180	96,597

3.6 Model Konverter Boost

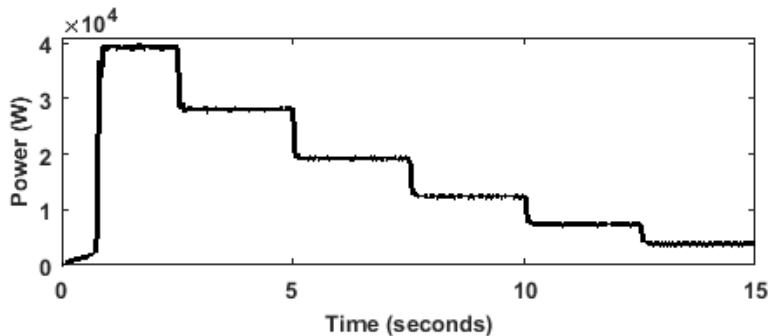
Konverter boost berfungsi untuk menaikkan tegangan sumber. Selain itu, dengan pengaturan *duty cycle* oleh MPPT, konverter boost dapat mengatur kecepatan rotor PMSG. Pengaturan kecepatan ini bertujuan untuk mendapatkan daya turbin yang optimal. Dalam mendesain konverter boost, parameter induktor dan kapasitor harus

dihitung dengan teliti agar nilai riak arus dan tegangan tetap pada level yang diinginkan.

Parameter yang digunakan untuk menghitung nilai induktor (L) dan kapasitor (C) adalah sebagai berikut :

- a) Tegangan keluaran konverter = 500 Volt
- b) Riak arus keluaran = $\pm 1 \%$
- c) Riak tegangan keluaran = $\pm 1 \%$
- d) Frekuensi pensaklaran = 50 kHz

Berdasarkan persamaan (4) dan (5) dan parameter yang digunakan di atas, maka ditentukan besar nilai induktor sebesar 196 mH dan nilai kapasitor sebesar 21.6 mF. Model konverter boost kemudian diuji menggunakan model kecepatan angin yang telah dijelaskan pada sub-bab sebelumnya. Daya dan efisiensi konverter ditunjukkan pada Gambar 3.17 dan Tabel 3.8 berikut ini.

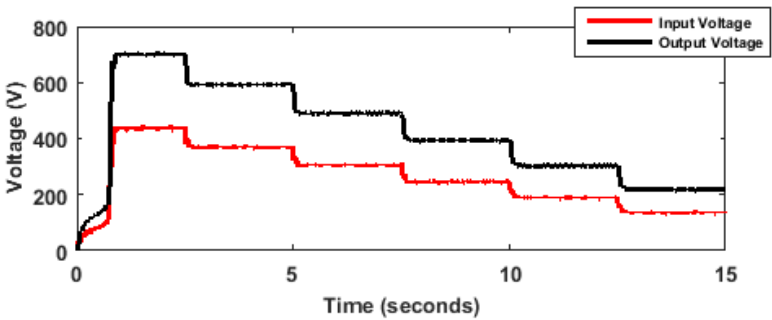


Gambar 3.17 Daya Keluaran Konverter Boost

Tabel 3.8 Efisiensi Konverter Boost

No.	Kecepatan Angin (m/s)	Daya Penyearah (W)	Daya Beban (W)	Efisiensi (%)
1	4	3907	3761	96,263
2	5	7534	7384	98,009
3	6	12310	12130	98,537
4	7	19180	18870	98,383
5	8	27840	27750	99,676
6	9	39180	39040	99,642

Setelah mengetahui efisiensi dari konverter boost, maka selanjutnya adalah verifikasi dari sisi tegangan. Tegangan keluaran dari konverter boost selalu lebih besar dari tegangan masukannya. Dengan memakai model kecepatan angin yang sudah dibahas sebelumnya, kita akan melihat tegangan masukan dan keluaran dari konverter boost pada Gambar 3.18 berikut ini.



Gambar 3.18 Tegangan Masukan dan Keluaran Konverter Boost

3.7 Model Konverter Bidirectional

Konverter bidirectional bekerja dengan cara mengatur waktu menyala dan mati dari kedua saklar untuk mengatur aliran daya dua arah ke penyimpanan energi. Pengaturan aliran daya ini bertujuan untuk menjaga tegangan beban tetap konstan, melalui proses pengisian dan pengosongan

penyimpan energi. Pada Tugas Akhir ini, kontroler bidirectional bekerja dengan menggunakan referensi tegangan beban seperti yang terdapat pada Gambar 3.1. Konverter bidirectional memiliki sebuah induktor (L), kapasitor pada sisi tegangan tinggi (C_H), dan kapasitor pada sisi tegangan rendah (C_L). Berdasarkan persamaan (6), (7), dan (8) nilai parameter L , C_H , dan C_L dari konverter bidirectional dapat diketahui, yaitu L sebesar 5 mH, C_H sebesar 16 μ F, dan C_L sebesar 1 μ F.

Konverter bidirectional membutuhkan sebuah kontroler yang dapat mengatur proses mati dan nyala dari kedua saklar agar proses pengisian dan pengosongan penyimpanan energi dapat dilakukan untuk menjaga keseimbangan daya. Kontroler PI dapat dipilih untuk mengatur proses tersebut berdasarkan perubahan arus yang dirasakan kontroler ini.

Kontroler PI bekerja menggunakan arus referensi, arus aktual, kesalahan, dan *duty cycle*. Arus referensi merupakan nilai arus hasil proses EMS (*Energy Management Systems*) sedangkan arus aktual adalah hasil pengukuran arus sebenarnya. Kesalahan merupakan selisih antara arus referensi dan arus aktual dan *duty cycle* merupakan keluaran dari kontroler PI. Kontroler PI bertugas untuk menyesuaikan nilai *duty cycle* sehingga nilai arus aktual sama dengan nilai arus referensi. Pada kondisi ini kesalahan akan bernilai nol. Pemilihan nilai parameter K_p dan K_i dilakukan secara *trial and error*, didapatkan nilai $K_p = 1$ dan $K_i = 1$.

3.8 Model Baterai

Pada Tugas Akhir ini, digunakan model baterai yang berasal dari *block generic* MATLAB/Simulink R2015a. Baterai yang digunakan adalah tipe LC-R1233P milik Panasonic. Baterai ini memiliki tegangan terminal sebesar 12 V dan kapasitas sebesar 33 Ah. Agar mencapai tegangan kerja sebesar 204 V, maka baterai disusun secara seri sebanyak 17 buah. Parameter-parameter baterai LC-R1233P setelah disusun seri sebanyak 17 buah dapat dilihat dalam tabel berikut.

Tabel 3.9 Parameter Modul Baterai

Tegangan Nominal (V)	204 V
Kapasitas Rating (Ah)	33 Ah
Kapasitas Maksimum (Ah)	34,375 Ah
Tegangan Penuh (V)	222,1186 V

Arus Nominal Discharge (A)	6,6 A
Resistansi Internal (Ohm)	0,119 Ohm
Kapasitas (Ah) @ Tegangan Nominal	10,2392 Ah

3.9 Model Superkapasitor

Pada Tugas Akhir ini, digunakan model superkapasitor yang berasal dari block generic MATLAB/Simulink R2015a. Superkapasitor yang digunakan adalah XLR Supercapacitor milik Eaton. Tegangan nominal dari superkapasitor adalah 48 V dan kapasitansinya sebesar 166 F. Untuk mencapai tegangan kerja sebesar 192 V, maka superkapasitor diseri sebanyak 4 buah. Parameter dari modul superkapasitor dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 3.10 Parameter Modul Superkapasitor

Tegangan Nominal (V)	192 Volt
Kapasitansi (F)	41,67 Farad
Resistansi Internal (Ohm)	0,02 Ohm

BAB 4

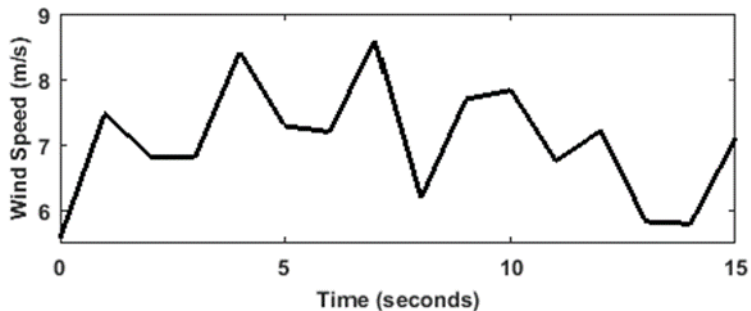
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengujian Penyimpan Energi Hibrida sebagai *Power Smoothing*

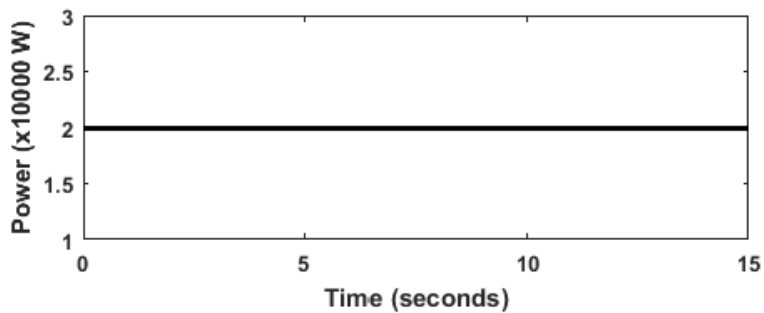
Dalam sub-bab ini, akan dilakukan simulasi penyimpanan energi hibrida sebagai penghalus daya dalam sistem turbin angin. Kontroler yang digunakan untuk mengatur konverter adalah kontroler PI. Penyimpanan energi hibrida diharapkan mampu mempertahankan tegangan beban pada nilai 500 V dalam beberapa kondisi, yang pertama adalah kecepatan angin berubah sedangkan daya beban konstan, yang kedua adalah kecepatan angin konstan sedangkan daya beban berubah, dan yang terakhir adalah kecepatan angin dan daya beban sama – sama berubah.

4.1.1 Kecepatan Angin Berubah dan Daya Beban Konstan (kasus 1)

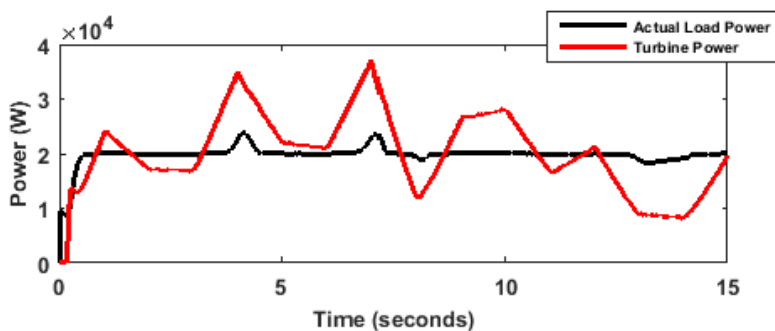
Permodelan kecepatan angin yang berubah secara acak ditunjukkan pada Gambar 4.1 dan kebutuhan daya beban ditunjukkan pada Gambar 4.2. Variasi kecepatan angin dilakukan secara acak dengan variasi antara 5.5 m/s hingga 8.5 m/s. Perubahan kecepatan angin mengakibatkan perubahan daya keluaran turbin angin. Sedangkan kebutuhan daya beban konstan pada 20 kW. Hasil simulasi dapat dilihat dalam gambar – gambar berikut ini.



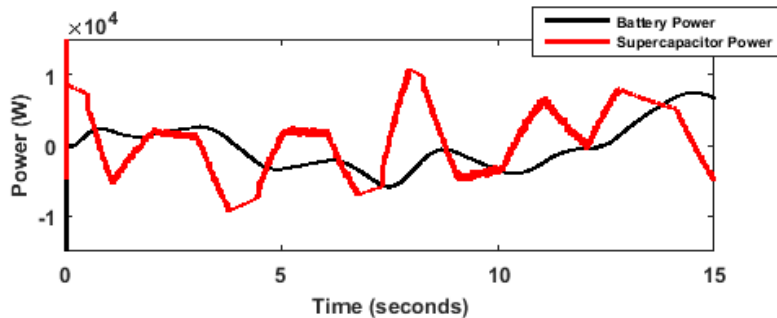
Gambar 4.1 Kecepatan Angin Kasus 1



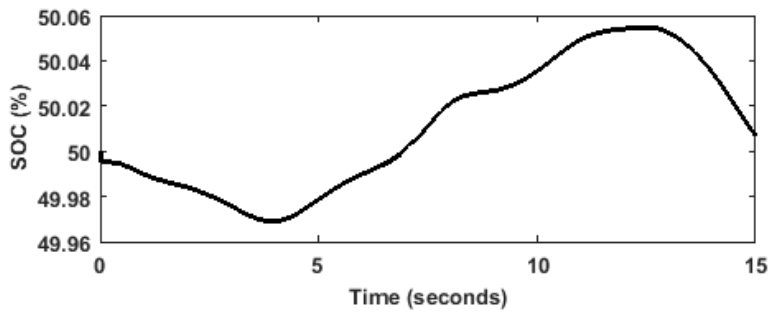
Gambar 4.2 Kebutuhan Daya Beban Kasus 1



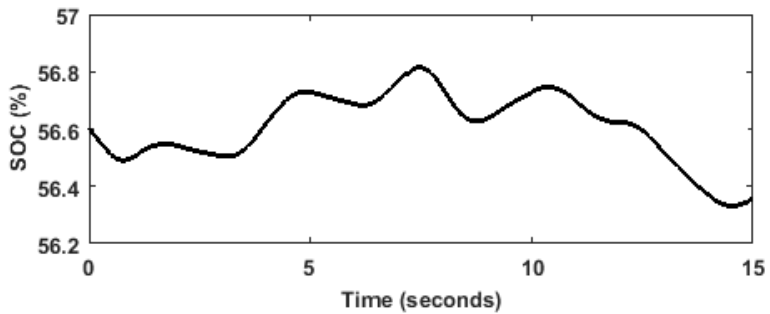
Gambar 4.3 Daya Turbin dan Daya Aktual Beban Kasus 1



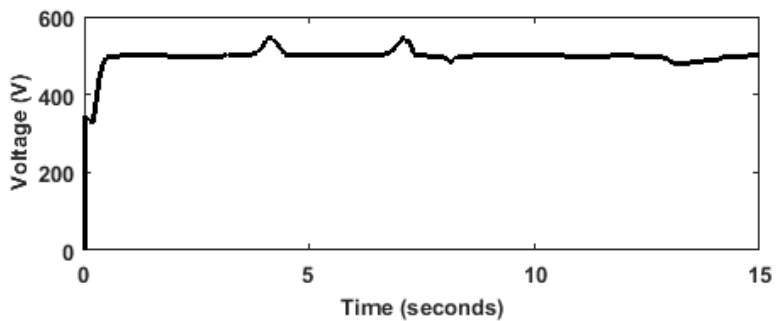
Gambar 4.4 Daya Baterai dan Daya Superkapasitor Kasus 1



Gambar 4.5 SOC Baterai Kasus 1



Gambar 4.6 SOC Supercapacitor Kasus 1



Gambar 4.7 Tegangan DC Link Kasus 1

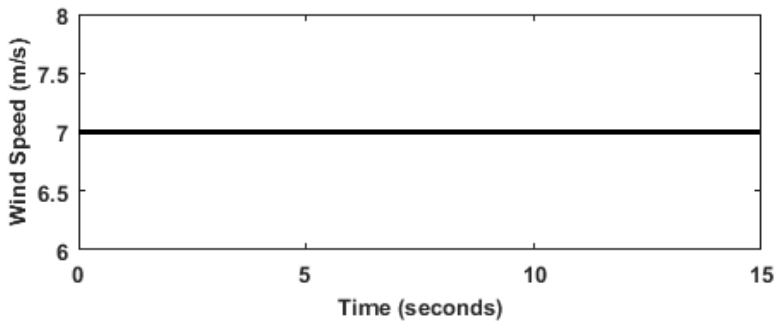
Dengan kecepatan angin yang berubah, maka daya yang dihasilkan oleh turbin angin juga ikut berubah. Perubahan daya pada turbin angin ini harus diantisipasi oleh penyimpan energi hibrida untuk menjaga daya beban konstan pada nilai 20 kW. Perbandingan daya turbin dan daya aktual beban dapat dilihat pada Gambar 4.3. Dari Gambar 4.7, terlihat bahwa tegangan beban dapat dijaga konstan pada nilai 500 V. Hal ini disebabkan karena penyimpan energi hibrida, yaitu baterai dan superkapasitor dapat mengkompensasi perubahan daya yang terjadi pada turbin angin. Perbandingan daya baterai dan superkapasitor dapat dilihat pada Gambar 4.4. Saat kecepatan angin rendah, daya yang dihasilkan oleh turbin juga rendah sehingga penyimpan energi hibrida harus melakukan proses pengosongan untuk membantu turbin angin memenuhi kebutuhan beban. Sedangkan pada saat kecepatan angin tinggi, daya yang dihasilkan oleh turbin angin juga tinggi sehingga penyimpan energi hibrida harus melakukan proses pengisian untuk menyerap kelebihan daya. Dengan begitu daya pada beban dapat dijaga konstan pada nilai 20 kW. Begitu pula dengan tegangan beban yang konstan pada nilai 500 V. SOC baterai dan superkapasitor dapat dilihat pada Gambar 4.5 dan Gambar 4.6.

Dari hasil simulasi terlihat bahwa respon superkapasitor terhadap perubahan daya lebih cepat daripada baterai. Saat terjadi perubahan dari mengisi ke mengosongkan atau sebaliknya secara cepat, maka superkapasitor dapat mengkompensasi perubahan tersebut dengan cepat pula, sedangkan baterai merespon perubahan tersebut dengan lambat. Hal ini dikarenakan superkapasitor memiliki kerapatan daya yang lebih tinggi dari baterai. Kerapatan daya yang tinggi ini memungkinkan superkapasitor untuk merespon perubahan daya yang terjadi secara tiba – tiba.

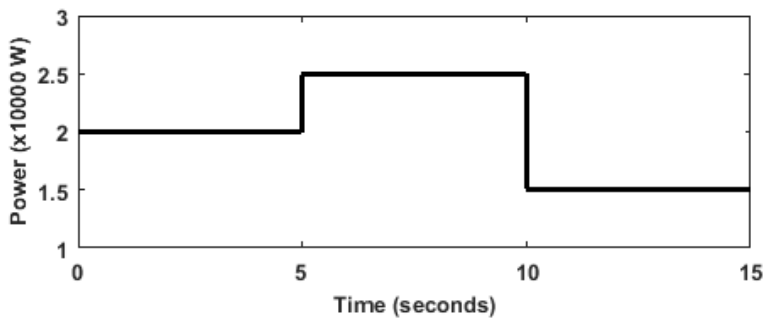
4.1.2 Kecepatan Angin Konstan dan Daya Beban Berubah (kasus 2)

Simulasi berikutnya adalah simulasi pada sistem turbin angin yang menggunakan penyimpan energi hibrida dengan membuat kecepatan angin konstan sedangkan kebutuhan daya beban berubah. Permodelan kecepatan angin yang konstan ditunjukkan pada Gambar 4.8. Kecepatan angin konstan pada nilai 7 m/s. Kecepatan angin yang konstan ini mengakibatkan daya keluaran turbin angin juga konstan. Sedangkan kebutuhan daya beban berubah secara bertahap, yaitu pada $t = 0$ sampai $t = 5$ daya beban adalah 20 kW, sedangkan pada $t = 5$ sampai $t = 10$ daya beban meningkat menjadi 25 kW, dan pada $t = 10$ sampai $t = 15$ daya

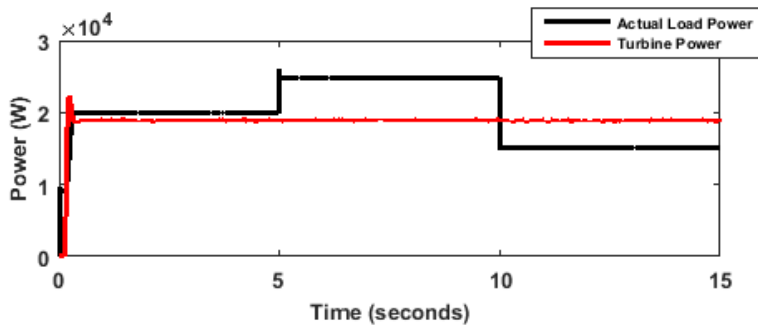
beban turun menjadi 15 kW. Kebutuhan daya beban ditunjukkan pada Gambar 4.9. Perbandingan daya turbin dan daya aktual beban dapat dilihat pada Gambar 4.10. Meskipun kebutuhan daya berubah, tegangan beban tetap harus dijaga konstan pada nilai 500 V. SOC baterai dan superkapasitor dapat dilihat pada Gambar 4.12 dan Gambar 4.13. Hasil simulasi dapat dilihat dalam gambar – gambar berikut ini.



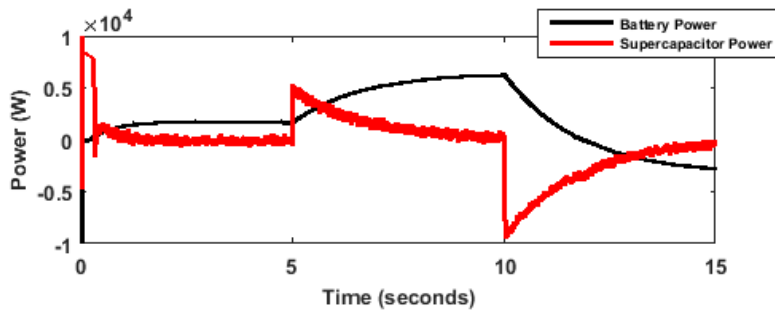
Gambar 4.8 Kecepatan Angin Kasus 2



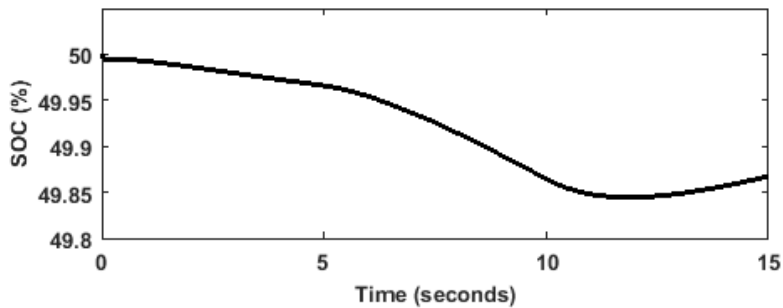
Gambar 4.9 Kebutuhan Daya Beban Kasus 2



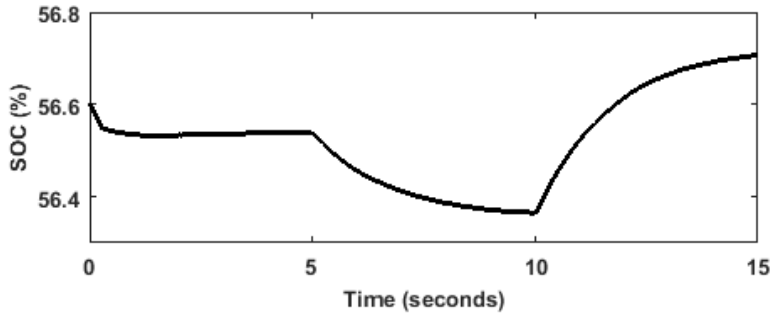
Gambar 4.10 Daya Turbin dan Daya Aktual Beban Kasus 2



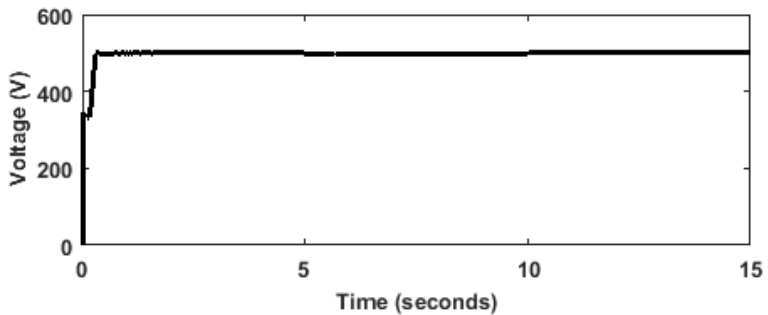
Gambar 4.11 Daya Baterai dan Daya Superkapasitor Kasus 2



Gambar 4.12 SOC Baterai Kasus 2



Gambar 4.13 SOC Superkapasitor Kasus 2



Gambar 4.14 Tegangan DC Link Kasus 2

Dengan kecepatan angin yang konstan, maka daya yang dihasilkan oleh turbin angin juga konstan. Perubahan daya pada beban harus diantisipasi oleh penyimpan energi hibrida agar beban tetap mendapatkan daya sesuai dengan kebutuhan meskipun daya turbin angin konstan serta menjaga tegangan beban pada nilai 500 V. Dari Gambar 4.14, terlihat bahwa tegangan beban dapat dijaga konstan pada nilai 500 V. Hal ini disebabkan karena penyimpan energi hibrida, yaitu baterai dan superkapasitor dapat mengkompensasi perubahan daya yang terjadi pada beban, seperti yang terlihat pada Gambar 4.11. Pada saat $t = 0$ sampai $t = 5$, daya yang dihasilkan oleh turbin angin tidak mencukupi kebutuhan daya beban sebesar 20 kW sehingga penyimpan energi hibrida harus melakukan proses pengosongan untuk membantu turbin angin memenuhi kebutuhan beban. Pada saat $t = 5$ sampai $t = 10$, daya beban meningkat

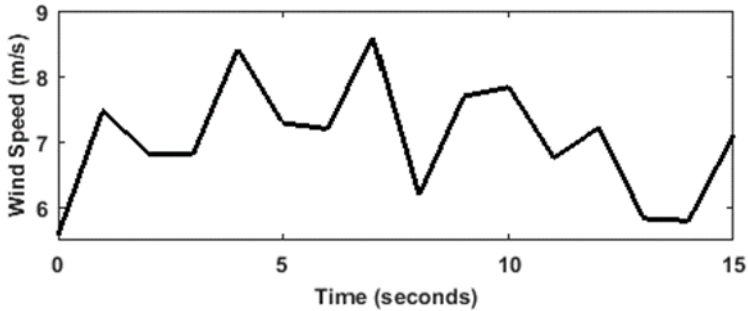
menjadi 25 kW sementara daya turbin angin tetap konstan sehingga penyimpan energi hibrida harus meningkatkan suplai dayanya agar daya beban terpenuhi. Pada $t = 10$ sampai $t = 15$, daya beban turun menjadi 15 kW. Pada kondisi ini, daya turbin angin lebih besar daripada kebutuhan daya beban sehingga penyimpan energi hibrida harus melakukan proses pengisian untuk menyerap kelebihan daya. Dengan proses charging dan discharging dari penyimpan energi hibrida inilah tegangan beban dapat dijaga konstan pada nilai 500 V.

Dari hasil simulasi terlihat bahwa respon superkapasitor terhadap perubahan daya lebih cepat daripada baterai. Saat terjadi perubahan dari pengisian ke pengosongan atau sebaliknya secara cepat, maka superkapasitor dapat mengkompensasi perubahan tersebut dengan cepat pula, sedangkan baterai merespon perubahan tersebut dengan lambat. Hal ini dikarenakan superkapasitor memiliki kerapatan daya yang lebih tinggi dari baterai. Kerapatan daya yang tinggi ini memungkinkan superkapasitor untuk merespon perubahan daya yang terjadi secara tiba – tiba. Namun, superkapasitor memiliki kerapatan energi yang lebih rendah daripada baterai. Kerapatan energi yang rendah ini mengakibatkan superkapasitor tidak dapat menyuplai daya dalam waktu yang relatif lama seperti halnya baterai.

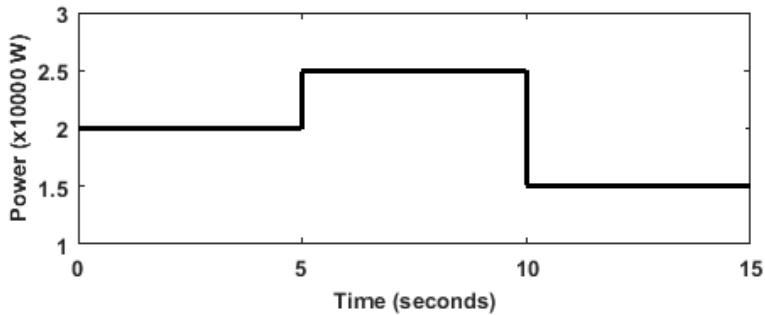
4.1.3 Kecepatan Angin Berubah dan Daya Beban Berubah (kasus 3)

Simulasi berikutnya adalah simulasi pada sistem turbin angin yang menggunakan penyimpan energi hibrida dengan membuat kecepatan angin dan kebutuhan daya beban sama - sama berubah. Simulasi ini bertujuan untuk mengetahui performa dari penyimpan energi hibrida dalam merespon kondisi dimana kecepatan angin dan kebutuhan daya beban sama-sama berubah. Permodelan kecepatan angin yang berubah ditunjukkan pada Gambar 4.15. Kecepatan angin bervariasi secara acak mulai dari 5.5 m/s sampai 8.5 m/s. Kecepatan angin yang acak ini mengakibatkan daya keluaran turbin angin juga berubah. Sedangkan kebutuhan daya beban berubah secara bertahap, yaitu pada $t = 0$ sampai $t = 5$ daya beban adalah 20 kW, sedangkan pada $t = 5$ sampai $t = 10$ daya beban meningkat menjadi 25 kW, dan pada $t = 10$ sampai $t = 15$ daya beban turun menjadi 15 kW, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.16. Perbandingan daya turbin dan daya aktual beban dapat dilihat pada Gambar 4.17. Meskipun kecepatan angin dan kebutuhan daya berubah,

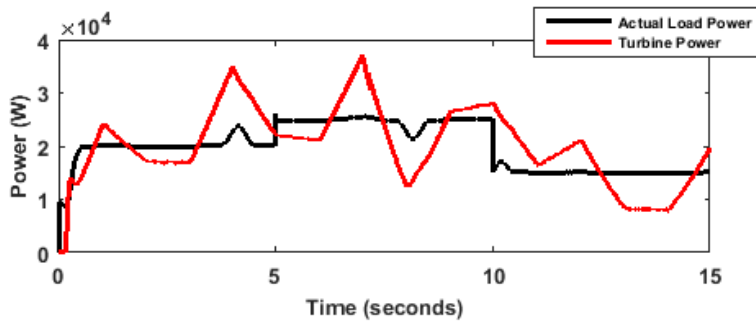
tegangan beban tetap harus dijaga konstan pada nilai 500 V. Hasil simulasi dapat dilihat dalam gambar 4.15 sampai gambar 4.21 berikut ini.



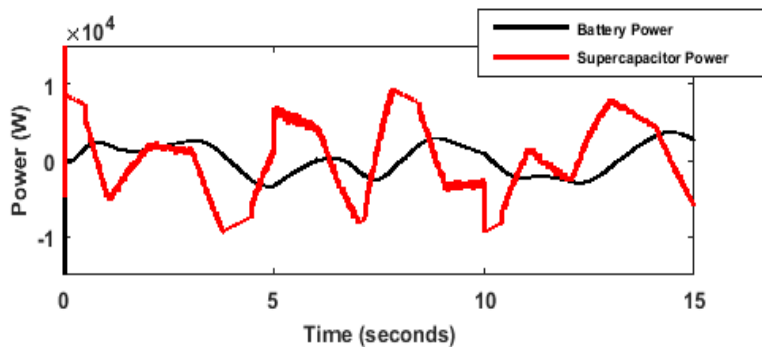
Gambar 4.15 Kecepatan Angin Kasus 3



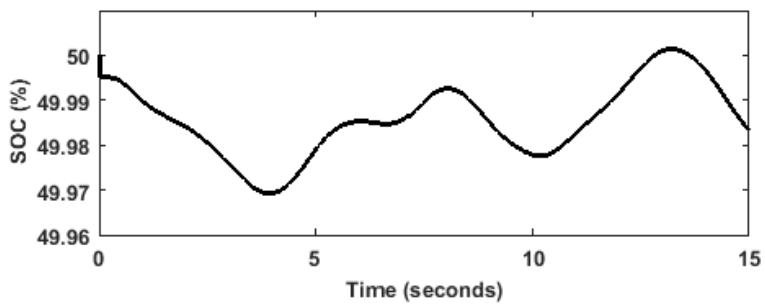
Gambar 4.16 Kebutuhan Daya Beban Kasus 3



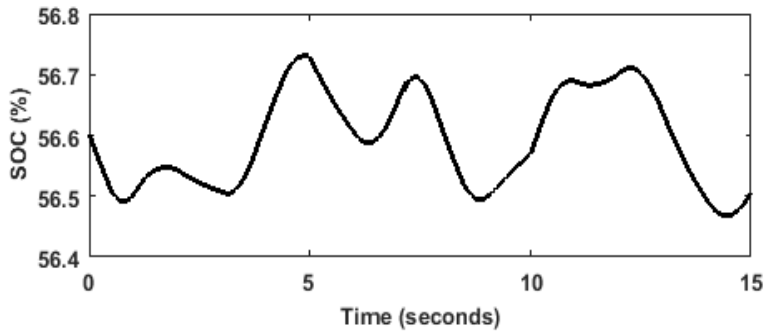
Gambar 4.17 Daya Turbin dan Daya Aktual Beban Kasus 3



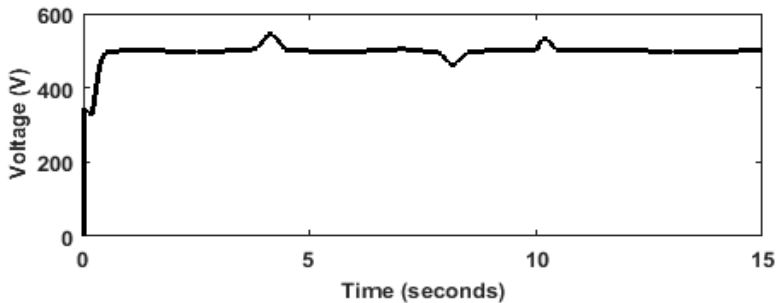
Gambar 4.18 Daya Baterai dan Daya Superkapasitor Kasus 3



Gambar 4.19 SOC Baterai Kasus 3



Gambar 4.20 SOC Superkapasitor Kasus 3



Gambar 4.21 Tegangan DC Link Kasus 3

Dengan kecepatan angin yang berubah, maka daya yang dihasilkan oleh turbin angin juga ikut berubah. Di sisi lain, kebutuhan daya beban tidak konstan, melainkan berubah. Perubahan daya pada turbin angin dan beban ini harus diantisipasi oleh penyimpan energi hibrida untuk menjaga daya beban tetap terpenuhi dan tegangan beban konstan pada nilai 500 V. Dari Gambar 4.21, terlihat bahwa tegangan beban dapat dijaga konstan pada nilai 500 V. Hal ini disebabkan karena penyimpan energi hibrida, yaitu baterai dan superkapasitor dapat mengkompensasi perubahan daya yang terjadi pada turbin angin dan beban, seperti yang terlihat pada Gambar 4.18. Kontroler akan membandingkan daya turbin angin dengan daya beban. Jika daya turbin angin lebih besar daripada daya beban, maka kontroler akan memerintahkan penyimpan energi hibrida untuk melakukan proses pengisian untuk menyerap kelebihan daya yang ada. Jika daya turbin

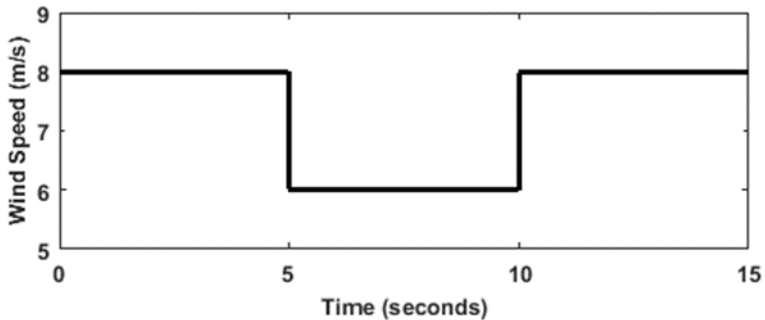
angin lebih kecil daripada daya beban, maka kontroler akan memerintahkan penyimpanan energi untuk melakukan proses pengosongan untuk menyuplai kekurangan daya. SOC baterai dan superkapasitor dapat dilihat pada Gambar 4.19 dan Gambar 4.20. Dengan begitu daya pada beban dapat terpenuhi dan tegangan beban dapat dijaga konstan pada nilai 500 V.

4.2 Pengujian *Energy Management Systems* (EMS)

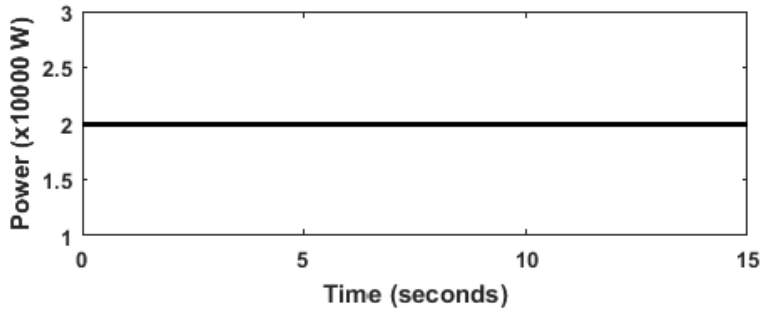
Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kinerja dari EMS dalam mengatur aliran daya antara baterai dan superkapasitor. Selain itu, EMS juga bertugas untuk menjaga SOC baterai dan superkapasitor tetap pada level yang diinginkan. Batas atas SOC adalah 95 % dan batas bawah adalah 25 %. Baterai dan Superkapasitor tidak diperkenankan untuk bekerja melebihi batas-batas SOC yang sudah ditentukan. Pengujian ini dibedakan menjadi 2 kasus, yang pertama adalah pengujian batas atas dan yang kedua adalah pengujian batas bawah.

4.2.1 Pengujian Batas Atas SOC

Pada kasus ini, baterai memiliki SOC awal sebesar 94.97% dan superkapasitor memiliki SOC awal sebesar 94.98 %. SOC dari kedua penyimpanan energi tersebut dikondisikan sedemikian rupa agar kinerja dari EMS dapat terlihat pada kondisi SOC mendekati batas atas. Kecepatan angin yang digunakan ditunjukkan dalam Gambar 4.22 berikut:

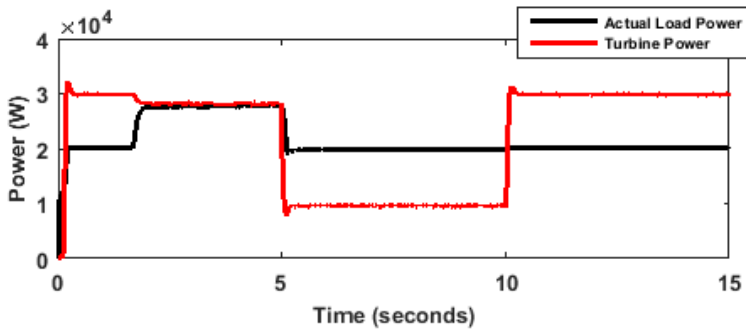


Gambar 4.22 Kecepatan Angin pada Pengujian Batas Atas SOC

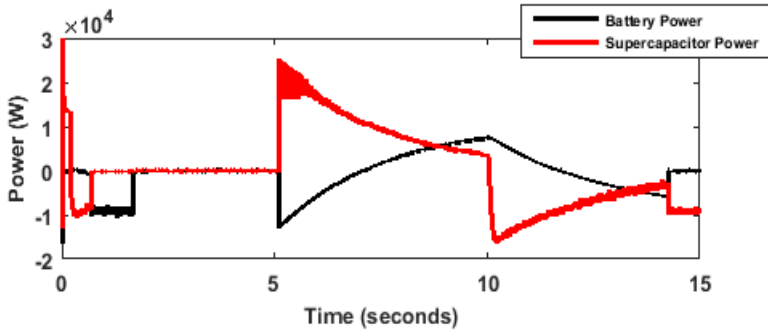


Gambar 4.23 Kebutuhan Daya Beban pada Pengujian Batas Atas SOC

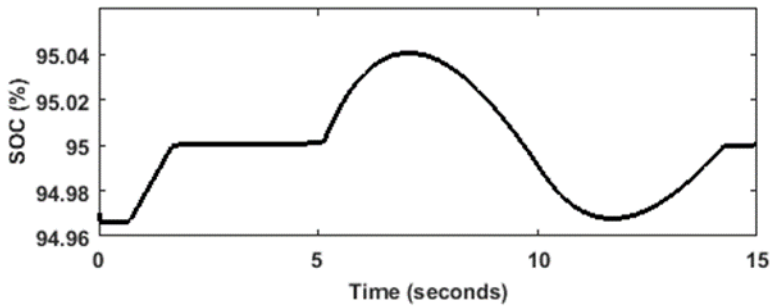
Kecepatan angin dimodelkan sebagai perubahan tiba - tiba dari 8 m/s menuju 6 m/s dan kembali ke 8 m/s. Karena pada kasus ini yang diuji adalah kinerja EMS saat SOC mendekati batas atas (95%) maka kecepatan angin dimodelkan sedemikian rupa agar pada saat awal daya yang dihasilkan oleh turbin angin melebihi daya beban, dimana kebutuhan daya beban adalah konstan 20 kW, seperti pada Gambar 4.23. Hasil simulasi dapat dilihat dalam gambar berikut ini.



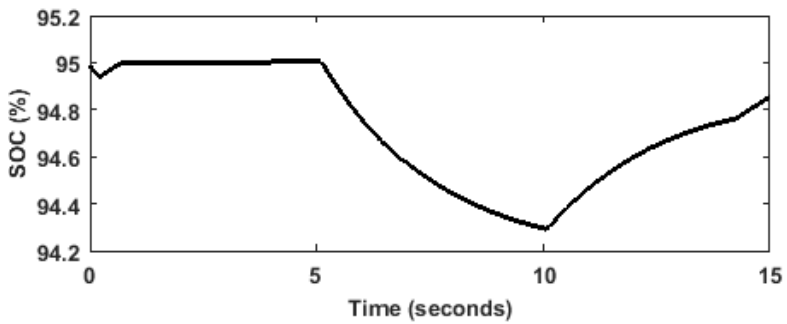
Gambar 4.24 Daya Turbin dan Daya Aktual Beban pada Pengujian Batas Atas SOC



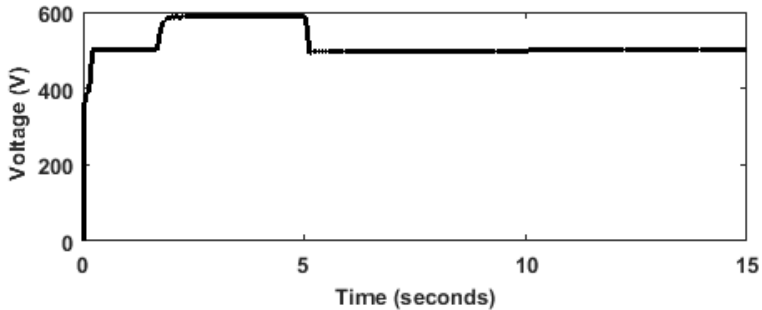
Gambar 4.25 Daya Baterai dan Daya Superkapasitor pada Pengujian Batas Atas SOC



Gambar 4.26 SOC Baterai pada Pengujian Batas Atas SOC



Gambar 4.27 SOC Superkapasitor pada Pengujian Batas Atas SOC



Gambar 4.28 Tegangan DC Link pada Pengujian Batas Atas SOC

Dari simulasi tersebut, kita dapat mengetahui bahwa EMS sudah bekerja dengan baik. Pada Gambar 4.28, saat $t = 0$ sampai $t = 1.7$, tegangan beban dapat dijaga konstan pada 500 V. Hal ini dikarenakan pada kondisi awal SOC baterai adalah 94.97% dan SOC superkapasitor sebesar 94.98%, dapat dilihat pada Gambar 4.26 dan Gambar 4.27, sehingga kedua penyimpan energi ini masih dapat melakukan pengisian, oleh karenanya kelebihan daya masih dapat diserap oleh penyimpan energi. Namun, proses pengisian superkapasitor tidak dapat bertahan lama karena SOC nya sudah mencapai 95% sehingga superkapasitor berhenti mengisi. Karena superkapasitor berhenti mengisi, maka seluruh kelebihan daya akan diserap oleh baterai. Pada kondisi sesaat setelah superkapasitor berhenti mengisi, daya yang diterima baterai adalah daya frekuensi tinggi karena arus yang diterima tidak difilter oleh *Low Pass Filter*.

Pada $t = 1.7$ sampai $t = 5$, tegangan beban tidak dapat dipertahankan konstan di 500 V. Hal ini dikarenakan kedua penyimpan energi, yaitu baterai dan superkapasitor telah mencapai SOC 95% sehingga keduanya tidak dapat menyerap kelebihan daya yang ada.

Pada $t = 5$ sampai $t = 10$, kecepatan angin berubah dari 8 m/s menjadi 6 m/s yang mengakibatkan daya yang dihasilkan oleh turbin angin (10 kW) menjadi lebih rendah daripada kebutuhan daya beban (20 kW). Perbandingan daya turbin dan daya aktual beban dapat dilihat pada Gambar 4.24. Pada kondisi ini, tegangan beban dapat dipertahankan di 500 V karena terjadi perubahan yang mengharuskan kedua penyimpan energi melakukan pengosongan. Proses ini tentunya dapat dilakukan

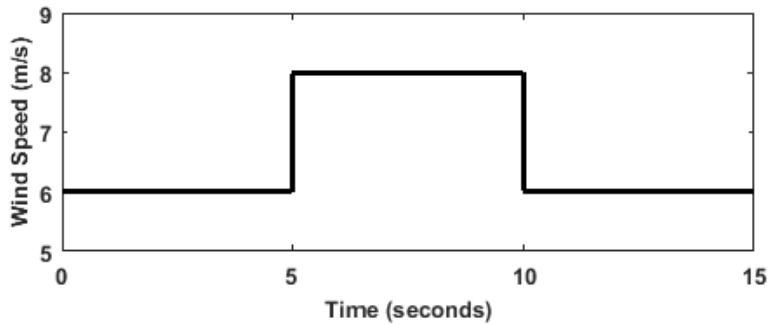
karena SOC baterai dan superkapasitor adalah 95%. Namun, pada $t = 5$, terjadi fenomena transien pada kedua penyimpan energi. Hal ini disebabkan karena EMS yang digunakan mengandung saklar untuk proses konduksi penyimpan energi yang mana proses ini menjadi pemicu terjadinya fenomena transien. Perbandingan daya baterai dan superkapasitor dapat dilihat pada Gambar 4.25.

Pada $t = 10$ sampai $t = 15$, kecepatan angin berubah dari 6 m/s menjadi 8 m/s. Hal ini menyebabkan daya yang dihasilkan oleh turbin angin (30 kW) menjadi lebih besar daripada kebutuhan daya beban (20 kW). Perubahan ini mengakibatkan kedua penyimpan energi harus melakukan proses pengisian untuk menyerap kelebihan daya yang ada. Tentunya proses ini dapat dilakukan karena SOC baterai dan superkapasitor telah turun mengingat pada $t = 5$ sampai $t = 10$ kedua penyimpan energi itu telah melakukan proses pengosongan. Oleh karena itu tegangan beban dapat dijaga konstan di 500 V.

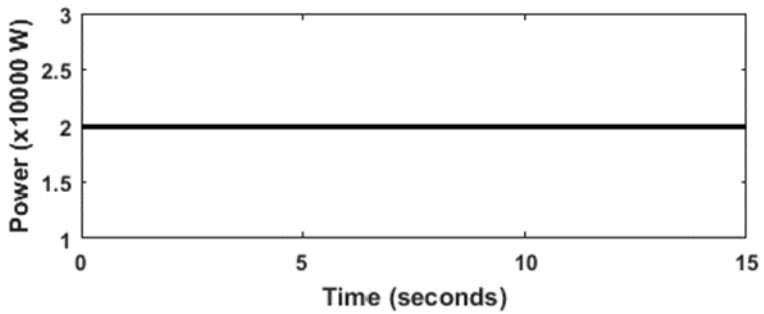
Pada $t = 14.25$ sampai $t = 15$, SOC baterai telah mencapai 95% yang mengakibatkan baterai harus berhenti dari proses pengisian. Karena baterai telah berhenti mengisi, maka seluruh kelebihan daya akan diserap oleh superkapasitor.

4.2.2 Pengujian Batas Bawah SOC

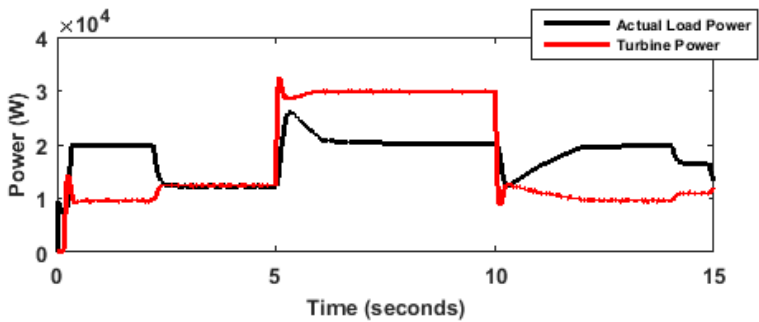
Pada kasus ini, baterai memiliki SOC awal sebesar 25.1% dan superkapasitor memiliki SOC awal sebesar 25.08%. SOC dari kedua penyimpan energi tersebut dikondisikan sedemikian rupa agar kinerja dari EMS dapat terlihat pada kondisi SOC mendekati batas bawah. Kecepatan angin yang digunakan ditunjukkan dalam Gambar 4.29. Kecepatan angin dimodelkan sebagai perubahan *step* dari 6 m/s menuju 8 m/s pada $t = 5$ dan kembali ke 6 m/s pada $t = 10$. Karena pada kasus ini yang diuji adalah kinerja EMS saat SOC mendekati batas bawah (25%) maka kecepatan angin dimodelkan sedemikian rupa agar pada saat awal daya yang dihasilkan oleh turbin angin kurang dari kebutuhan daya beban, dimana kebutuhan daya beban adalah konstan 20 kW, seperti pada Gambar 4.30. Hasil simulasi dapat dilihat dalam gambar berikut ini.



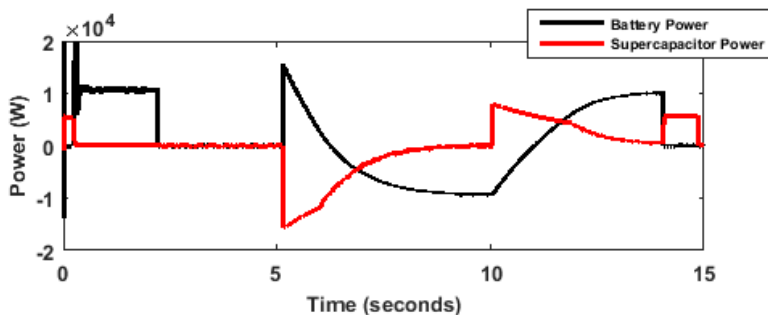
Gambar 4.29 Kecepatan Angin pada Pengujian Batas Bawah SOC



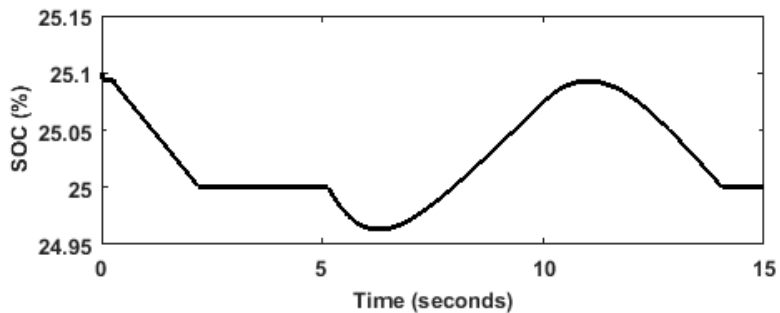
Gambar 4.30 Kebutuhan Daya Beban pada Pengujian Batas Bawah SOC



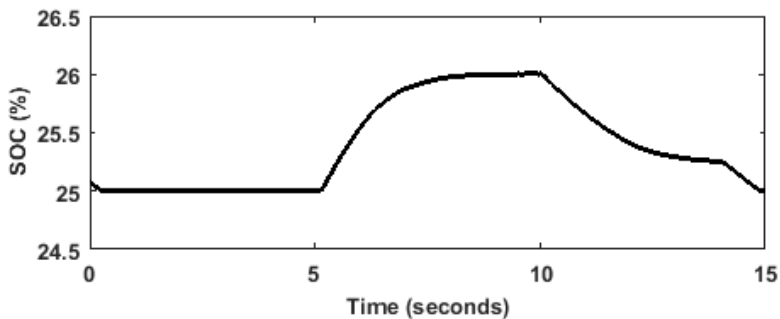
Gambar 4.31 Daya Turbin dan Daya Aktual Beban pada Pengujian Batas Bawah SOC



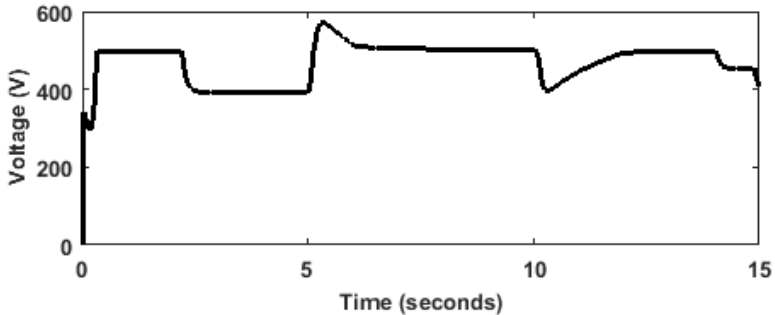
Gambar 4.32 Daya Baterai dan Daya Superkapasitor pada Pengujian Batas Bawah SOC



Gambar 4.33 SOC Baterai pada Pengujian Batas Bawah SOC



Gambar 4.34 SOC Superkapasitor pada Pengujian Batas Bawah SOC



Gambar 4.35 Tegangan DC Link pada Pengujian Batas Bawah SOC

Dari simulasi tersebut, kita dapat mengetahui bahwa EMS sudah bekerja dengan baik. Pada Gambar 4.35, saat $t = 0$ sampai $t = 2.2$, tegangan beban dapat dijaga konstan pada 500 V. Hal ini dikarenakan pada kondisi awal SOC baterai adalah 25.1% dan SOC superkapasitor sebesar 25.08%, dapat dilihat pada Gambar 4.33 dan Gambar 4.34 sehingga kedua penyimpanan energi ini masih dapat melakukan proses pengosongan untuk menutupi kekurangan daya turbin angin. Namun, proses pengosongan superkapasitor tidak dapat bertahan lama karena SOC-nya sudah mencapai 25% sehingga superkapasitor berhenti mengosongkan. Karena superkapasitor berhenti mengosongkan, maka seluruh kekurangan daya akan dipenuhi oleh baterai. Pada kondisi sesaat setelah superkapasitor berhenti mengosongkan, daya yang harus dipenuhi oleh baterai adalah daya frekuensi tinggi karena arus yang diterima tidak difilter oleh *Low Pass Filter*.

Pada $t = 2.2$ sampai $t = 5$, tegangan beban turun menjadi 400 V dan tidak dapat dipertahankan konstan di 500 V. Hal ini dikarenakan kedua penyimpanan energi, yaitu baterai dan superkapasitor telah mencapai SOC 25% sehingga keduanya tidak dapat memenuhi kekurangan daya yang ada.

Pada $t = 5$ sampai $t = 10$, kecepatan angin berubah dari 6 m/s menjadi 8 m/s yang mengakibatkan daya yang dihasilkan oleh turbin angin (30 kW) menjadi lebih besar daripada kebutuhan daya beban (20 kW). Perbandingan daya turbin dan daya aktual beban dapat dilihat pada Gambar 4.31. Pada kondisi ini, tegangan beban dapat dipertahankan di 500 V karena terjadi perubahan yang mengharuskan kedua penyimpan

energi untuk mengisi. Proses ini tentunya dapat dilakukan karena SOC baterai dan superkapasitor adalah 25%. Namun, pada $t = 5$, terjadi fenomena transien pada kedua penyimpanan energi. Hal ini disebabkan karena EMS yang digunakan mengandung saklar untuk proses konduksi penyimpanan energi yang mana proses ini menjadi pemicu terjadinya fenomena transien. Perbandingan daya baterai dan superkapasitor dapat dilihat pada Gambar 4.32.

Pada $t = 10$ sampai $t = 15$, kecepatan angin berubah dari 8 m/s menjadi 6 m/s. Hal ini menyebabkan daya yang dihasilkan oleh turbin angin (10 kW) menjadi lebih kecil daripada kebutuhan daya beban (20 kW). Perubahan ini mengakibatkan kedua penyimpanan energi harus melakukan proses pengosongan untuk memenuhi kekurangan daya yang ada. Tentunya proses ini dapat dilakukan karena SOC baterai dan superkapasitor telah meningkat mengingat pada $t = 5$ sampai $t = 10$ kedua penyimpanan energi itu telah melakukan proses pengisian. Oleh karena itu tegangan beban dapat dijaga konstan di 500 V.

Pada $t = 14$ sampai $t = 15$, SOC baterai telah mencapai 25% yang mengakibatkan baterai harus berhenti dari proses pengosogan. Karena baterai telah berhenti mengosongkan, maka seluruh kekurangan daya akan dipenuhi oleh superkapasitor. Jika diperhatikan lebih detil, waktu tunda tegangan beban pada kasus SOC awal 95% dan 25% berbeda. Waktu tunda pada kondisi SOC awal 95% lebih cepat sehingga tegangan yang dihasilkan lebih halus. Dapat disimpulkan bahwa parameter K_p dan K_i dari kontroler tegangan perlu dioptimasi untuk mengakomodasi perubahan SOC penyimpanan energi.

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil simulasi sistem turbin angin yang terhubung dengan penyimpan energi hibrida, yaitu baterai dan superkapasitor, didapatkan beberapa kesimpulan, yaitu :

1. Kontrol SOC (*State of Charge*) yang dilakukan oleh logika fuzzy telah berjalan dengan baik. Logika fuzzy dapat menjaga SOC baterai dan superkapasitor tidak melebihi batas-batas yang telah ditentukan, yaitu batas atas sebesar 95% dan batas bawah 25%.
2. Baterai dan superkapasitor dapat bekerja sama dengan baik sebagai penyimpan energi hibrida, ditandai dengan tegangan beban yang konstan pada berbagai variasi kecepatan angin dan daya bebaan. Kedua penyimpan energi ini memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing yang saling menutupi. Kerapatan daya baterai yang rendah ditutupi oleh kerapatan daya superkapasitor yang tinggi. Kerapatan energi baterai yang besar menutupi kerapatan energi superkapasitor yang rendah.
3. Dalam kondisi SOC yang berbeda, kinerja dari kontroler tegangan PI masih belum optimal.
4. Saat penyimpan energi hibrida melakukan transisi dari kondisi padam ke konduksi, terjadi fenomena transien pada penyimpanan energi tersebut.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil simulasi, diharapkan penelitian selanjutnya dapat menggunakan optimasi dalam menentukan K_p dan K_i dari kontroler tegangan PI agar kontroler dapat bekerja optimal dalam berbagai kondisi SOC serta diharapkan melakukan studi terhadap fenomena transien yang terjadi pada penyimpanan energi hibrida.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- [1] G. Mandic and A. Nasiri, "Modeling and Simulation of a Wind Turbine System with Ultracapacitors for Short-Term Power Smoothing," *IEEE*, vol. 10, pp. 2431 - 2436, 2010.
- [2] N. Mendis, K. M. Muttaqi, and S. Perera, "Active Power Management of a Supercapacitor-Battery Hybrid Energy Storage System for Standalone Operation of DFIG based Wind Turbine " *IEEE*, pp. 1 - 8, 2012.
- [3] C. Gao, J. Zhao, J. Wu, and X. Hao, "Optimal Fuzzy Logic Based Energy Management Strategy of Battery/Supercapacitor Hybrid Energy Storage System for Electric Vehicles," *IEEE*, pp. 98 - 102, 2016.
- [4] Z. Shengzhe, W. Kai, and X. Wen, "Fuzzy Logic-Based Control Strategy for a Battery/Supercapacitor Hybrid Energy Storage System in Electric Vehicles," *IEEE*, vol. 17, pp. 5598 - 5601, 2017.
- [5] Z. Cabrane, M. Quassaid, and M. Maaroufi, "Battery and supercapacitor for photovoltaic energy storage: a fuzzy logic management," *IET*, vol. 11, pp. 1157 - 1165, 2017.
- [6] O. N. Fauzi, "STUDI PENGGUNAAN SUPERKAPASITOR SEBAGAI PENYIMPAN ENERGI PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ANGIN," Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, 2018.
- [7] A. M. Howlader, N. Urasaki, S. Chakraborty, A. Yona, T. Senjyu, and A. Y. Saber, "Fuzzy Controller Based Output Power Levelling Enhancement for a Permanent Magnet Synchronous Generator," *IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, June 27-30, 2011 2011.
- [8] A. Shahi and C. Bhattacharjee, "A Study & Analysis of Fuzzy Based P&O MPPT Scheme in PMSG Based Wind Turbine," *IEEE International Conference on Technologies for Smart-City Energy Security and Power* March 28-30, 2018 2018.
- [9] S. Yang and Z. Zhigang, "Bi-directional DC/DC Converter and its practical Applications," *IEEE* 2014.
- [10] K. H. Chao, M. C. Tseng, C. H. Huang, Y. G. Liu, and L. C. Huang, "Design and Implementation of a Bidirectional DC-DC Converter for Stand-Alone Photovoltaic Systems," *International*

- Journal of Computer, Consumer, and Control (IJ3C)*, vol. 2, pp. 44 - 55, 2013.
- [11] M. R2015a, "*Battery*" in *Implement Generic Battery Model* 2015 ed., 2015.
 - [12] K. B. Adam and M. Ashari, "Design of Bidirectional Converter using Fuzzy Logic Controller to Optimize Battery Performance in Electric Vehicle," *IEEE International Seminar on Intelligent Technology and Its Application*, pp. 201 - 205, 2015.
 - [13] Wikipedia. (2018, 16 December 2018). *Supercapacitor*. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Supercapacitor>
 - [14] E. Supercapacitor, "XLR Supercapacitor 48 V, 166 F Rugged Module," in *Technical Data 10510*, ed: Eaton Supercapacitor, March 2016.
 - [15] M. R2015a, "*Supercapacitor*" in *Implement Generic Supercapacitor Model*, 2015 ed., 2015.
 - [16] I. Robandi, *Desain Sistem Tenaga Modern, Optimasi, Logika Fuzzy, dan Algoritma Genetika*, 1 ed. Yogyakarta: Penerbit ANDI 2006.
 - [17] D. Ragul, K. Selvakumar, C. S. Boophati, and K. Raja, "Power Smoothing of Grid Connected Direct-Driven Permanent Magnet Generator (PMSG) Wind Turbine," *Indian Journal of Science and Technology*, vol. 9, November 2016 2016.

BIODATA PENULIS



Rizka Prambudi, dilahirkan di Balikpapan, 24 Desember 1996. Penulis adalah putra dari pasangan Hendra Jaya dan Krisna Luxmi. Penulis memulai jenjang pendidikan di SD Khadijah II Surabaya, SMPN 1 Surabaya, dan SMAN 5 Surabaya hingga lulus tahun 2015. Pada tahun yang sama penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang perguruan tinggi dan diterima di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya di Departemen Teknik Elektro melalui jalur SNMPTN. Semasa kuliah, penulis aktif dalam

kegiatan kepanitiaan dan organisasi, diantaranya adalah sebagai kamzin ELECTRA V dan ELECTRA VI, dan anggota Divisi Workshop ITS 2017 dan 2018. Selain itu, penulis juga pernah menjadi finalis dalam lomba karya tulis ilmiah LKCT ELCCO 2018 di Universitas Udayana. Pada tahun 2018, karya tulis ilmiah milik penulis lolos dalam PKM terdani oleh Kemenristekdikti. Penulis dapat dihubungi melalui email : rizkapram@mhs.ee.its.ac.id